

คุณสมบัติการขนส่งอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพฤติกรรมการเสียหาย
ทางไฟฟ้าของฟิล์ม rGO แบบอิสระ

TEMPERATURE DEPENDENT TRANSPORT PROPERTIES AND HIGH-
BIAS BREAKDOWN BEHAVIOR OF FREE STANDING RGO FILMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KMITL-2022-SC-M-030-142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEMPERATURE DEPENDENT TRANSPORT PROPERTIES AND HIGH-
BIAS BREAKDOWN BEHAVIOR OF FREE STANDING RGO FILMS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILMENT OF THE REQUESTMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
KMITL-2022-SC-M-030-142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABNG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติการขนส่งอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพฤติกรรมการเสียหายทางไฟฟ้าของฟิล์ม rGO แบบอิสระ
ชื่อนักศึกษา	นายครองธรรม ธรรมครองอาตม์
รหัสประจำตัว	62605043
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.รัชก สมนพรเสนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รองศาสตราจารย์ ดร.ฮาริฮารา รามามูร์ตี

บทคัดย่อ

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ง่าย มีโครงสร้างแบบหลายชั้น และมีความสามารถในการรองรับกระแสไฟฟ้าที่สูงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุดังกล่าวเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงอยู่ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงของแผ่น rGO ที่มีขนาดอยู่ในระดับมิลลิเมตรและผ่านกระบวนการรีดิวซ์เพียงเล็กน้อยอย่างละเอียด ซึ่งจากผลที่ได้พบว่า กราฟของกระแส-แรงดันมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเห็นได้ชัด พร้อมทั้งมีฮิสเทรีซิสที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ซึ่งลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ แม้จะเคยได้รับการตีความโดยใช้แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะที่เคยใช้กันมา นั่นก็คือ แบบจำลอง Fowler-Nordheim tunneling และ space charge limited conduction มาก่อน แต่เมื่อนำแบบจำลองทั้งสองนี้มาใช้กับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่า ผลที่ได้เข้ากันได้ดีกับแบบจำลองเฉพาะในเชิงคุณภาพเท่านั้น แต่ในเชิงปริมาณ ผลที่ได้ยังไม่เข้ากับแบบจำลองใดๆ นั่นก็แสดงว่า ประเด็นที่เกี่ยวกับกลไกการขนส่งพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงของ rGO นั้น ยังคงมีความไม่ชัดเจนและยังต้องการการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติม จากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าซ้ำๆ หลายๆ รอบอย่างระมัดระวัง โดยในระหว่างแต่ละรอบนั้นได้ทิ้งเวลาไว้ระยะหนึ่ง พบว่า ฮิสเทรีซิสที่สังเกตได้นั้นประกอบด้วยทั้งส่วนที่

กักเก็บได้และที่กักเก็บไม่ได้ ซึ่งบ่งบอกว่าเกิดขึ้นจากผลของการดักจับประจุ (charge Trapping) และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความร้อนแบบจูล (Joule Heating) ตามลำดับ ผลการวัดกระแสและแรงดันที่ขึ้นอยู่กับเวลาได้แสดงให้เห็นว่า ผลของการดักจับประจุและการให้ความร้อนแบบจูลจะแสดงลักษณะเฉพาะให้เห็นในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยแยกออกเป็น 2 ช่วงเวลา และที่สำคัญ พบว่า การให้ความร้อนแบบจูลนั้นทำให้การนำไฟฟ้าของ rGO ดีขึ้นอย่างถาวร ซึ่งสืบผลมาจากการอบอ่อนด้วยกระแสไฟฟ้า (current annealing) ที่สามารถกำจัดกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนออกจาก rGO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์การเสียหายทางไฟฟ้า (electrical breakdown) ของตัวอย่าง พบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหตุการณ์รันอะเวย์ทางความร้อน (thermal runaway) ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่าง rGO เกิดการเสียหายทั้งๆที่ยังสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่านั้นอีก สุดท้ายนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของ rGO ภายใต้สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำในช่วงอุณหภูมิ 80-300 เคลวิน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พลังงานการกระตุ้นที่ลดลง (reduced activation energy) เผยให้เห็นถึงพฤติกรรมที่เป็นไปตามกฎยกกำลัง (power law) อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 230 เคลวิน ก่อนที่จะเบี่ยงเบนออกจากแนวโน้มนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการอบอ่อนด้วยกระแสไฟฟ้านั้น พบว่าเลขชี้กำลังของกฎยกกำลังมีค่าลดลง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในตัวอย่างมีบริเวณที่มีความไม่สมบูรณ์ของผลึกลดลงอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ, สนามไฟฟ้าแรงดันสูง, การให้ความร้อนแบบจูล, การดักจับประจุ, กฎกำลัง

Thesis Title	Temperature dependent transport properties and high-bias breakdown behavior of free standing rGO films
Student Name	Mr. Krongtham Thamkrong-art
Student ID	62605043
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2022
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Ratchanok Somphonsane
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Dr. Harihara Ramamoorthy

Abstract

Free-standing reduced graphene oxide (rGO) has been gaining popularity for its use in supercapacitors and battery applications due its facile synthesis, multi-layered structure, and high-current carrying capacity. Pertinent to the successful implementation of such applications, however, is the need to develop a thorough understanding of the electrical properties of such materials when subject to high applied electric fields. In this work, we undertake a detailed study of high-field electrical properties of mm-scale, lightly-reduced, rGO papers. Our results reveal that the I-V curves exhibit substantial nonlinearity with associated hysteresis that depends strongly on the applied electric field. The nonlinear behaviour which was interpreted using conventional transport models of Fowler–Nordheim tunnelling and space charge limited conduction revealed that while these models provided good qualitative fits to our data, they were quantitatively lacking, thus leaving the issue of high-field transport mechanisms in rGO open for debate. Careful I-V cycling experiments with measurement time-delay introduced between cycles revealed that the observed hysteresis contained recoverable and non-recoverable parts that we identified as arising from charge trapping and Joule heating effects, respectively. Time-dependent measurements showed that these effects were characterized by two distinct time scales. Importantly, the Joule heating was found to cause a permanent conductivity

improvement in the rGO via the ‘current annealing’ effect by effectively eliminating oxygenated groups from the rGO. The analysis of the electrical breakdown in our samples resembled a thermal runaway-like event that resulted in premature damage to the rGO. Finally, we investigated the low-field resistivity in the 80 K–300 K temperature range. The reduced activation energy analysis revealed a robust power law behaviour below 230 K, while deviating from this trend at higher temperatures. For samples that received current annealing treatment, a reduced value for the power law exponent was obtained, confirming the effective lowering of disordered regions.

Keyword: free-standing rGO, high-bias current-voltage behaviour, space charge limited conduction, Fowler-Nordheim tunneling, Joule heating, charge trapping, variable range hopping and power law transport



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.รัชก สมพรเสนห์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร. ฮาริฮารารามามูร์ตี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางที่ถูกต้องตลอดระยะเวลาของการทำวิจัยนี้ รวมทั้งแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันแห่งนี้ และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากงบประมาณของ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและคอยให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

นายครองธรรม ธรรมครองอาตม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กราฟีน (Graphene).....	5
2.1.1 โครงสร้างกายภาพ.....	7
2.1.2 คุณสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์.....	8
2.1.3 การขนส่งอิเล็กตรอน.....	10
2.1.4 คุณสมบัติการนำความร้อน.....	12
2.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน.....	13
2.3 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide).....	17
2.3.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของกราฟีนและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	18
2.3.2 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 กลไกการขนส่งพาหะประจุในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	25
2.4.1 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ Schottky (Schottky mechanism model).....	28
2.4.2 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ Poole-Frenkel (Poole-Frenkel mechanism model)	29
2.4.3 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบการชุดอุโมงค์ FN (F-N Tunneling mechanism model)	31
2.4.4 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ SCLC (Space charge limited current mechanism model)	32
2.4.5 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ TAT (Trap-assisted tunneling mechanism model)	36
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่าง	37
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	37
2.5.2 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectroscopy).....	38
2.5.3 เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD).....	40
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	43
3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ	43
3.1.1 สังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระด้วยเทคนิคการใช้เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration)	43
3.1.2 กระบวนการรีดักชันด้วยความร้อน (Thermal Reduction Process).....	44
3.1.3 ขี้ไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่อย่างอิสระ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การทดลองศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ที่อยู่ได้อย่างอิสระ	46
3.2.1 การเตรียมชุดทดลองสำหรับศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	46
3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ ได้อย่างอิสระ	46
3.2.3 การจัดเตรียมชุดทดลองสำหรับการศึกษากลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนโดยปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ	47
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง	50
4.1 กระบวนการรีดักชันกราฟีนออกไซด์ด้วยความร้อนเพื่อให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรี ดักชันเพียงเล็กน้อย	50
4.2 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าพื้นฐานจากการทดลอง จ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงและแบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุ	52
4.3 การทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงหลายรอบการทดลองเพื่อปรับปรุงการนำไฟฟ้าของฟิล์ม บางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	62
4.4 การทดลองวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยขึ้นกับเวลาภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง	64
4.5 พฤติกรรมการพังทลายทางไฟฟ้า	65
4.6 กลไกการขนส่งพาหะประจุที่แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำและผลกระทบของการหลอมด้วย กระแสไฟฟ้า	67
บทที่ 5 ผลการทดลอง	74
เอกสารอ้างอิง	76
ประวัติผู้เขียน	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนจากบนลงล่าง	16
2.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนจากล่างขึ้นบน	16
4.1 ตารางสรุปผลของความเหมาะสมของข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณสำหรับแบบจำลองที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงที่ใช้ในงานนี้.....	62
4.2 ตารางสรุปตัวอย่างในการทดลองและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองกฎกำลังสำหรับการศึกษาค่าสภาพต้านทานแบบ 4 ชั้นที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของกราฟีน.....	6
2.2 แสดงการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในกราฟีนในแนวแกน px, py และ pz	7
2.3 รูปแสดงความสัมพันธ์ของ Dispersion Relation และภาพขยายแถบพลังงานที่จุดดิเรค.....	9
2.4 กราฟแสดงตัวอย่างคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเทียบแรงดันเกจของกราฟีนที่ไม่ผ่านการโด๊ป (เส้นสีดำ) และกราฟีนที่ทำการโด๊ปด้วยโพแทสเซียม	11
2.5 กราฟตัวอย่างแสดงคุณสมบัติการนำความร้อนของกราฟีนในซึบสเตรทที่มีความหนาแตกต่างกัน	13
2.6 แม่แบบทั้งหมดของกราฟีน.....	15
2.7 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน	15
2.8 โครงสร้างทางเคมีสำหรับแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการลอกกราฟีน.....	18
2.9 โครงสร้างของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	20
2.10 โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	21
2.11 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการฮัมเมอร์ (Hummer's method).....	24
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแถบ D และแถบ D- ที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารเจือที่เป็นผู้ให้ (nD).....	26
2.13 อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบของวัสดุกับกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุ	28
2.14 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของปรากฏการณ์ Schottky ในโครงสร้างระหว่างโลหะ-ฉนวน-โลหะ	29
2.15 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของผลกระทบปรากฏการณ์ Poole-Frenkel	30
2.16 แผนภาพแสดงแบบจำลองการขนส่งพาหะประจุแบบ TAT	36
2.17 ภาพแสดงส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	38
2.18 กราฟแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และการเปรียบเทียบผล	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระหลังจากการลอกออกจากกระดาษกรองเมมเบรน.....	44
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนและฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ.....	45
3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ.....	45
3.4 เครื่องมือหน่วยการวัดแหล่งจ่าย (Source Meter Unit: SMU) รุ่น B2901A จาก Keysight Technology.....	46
3.5 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องทดลองวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป.....	48
3.6 ชุดทดลองการศึกษากลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนภายใต้ปัจจัยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป	48
4.1 (ก) ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้รับจากวิธีการกรองด้วยสุญญากาศและตามด้วยการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (หรือเรียกว่าฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อย) (ข) แผนภาพแสดงการตั้งค่าการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในขนาดมิลลิเมตรอยู่บนขั้วสัมผัสของบรอดพีซีบีมาตรฐาน (ค) ภาพตัดขวางจาก SEM (ด้านบน) แสดงความหนาโดยเฉลี่ยและแต่ละชั้นที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อยและการสแกนพื้นผิว (ด้านล่าง) เผยให้เห็นโครงสร้างทมางกายภาพของตัวอย่างที่ศึกษา (ง) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ที่ได้รับจากตัวอย่างที่ได้หลังจากการกรองด้วยสุญญากาศและการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที (จ) การเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบการเชื่อมต่อ 2 ขั้วและ 4 ขั้วสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวแทน (กว้าง 2 มม. ยาว 2 มม. และอัตราส่วนความเข้มข้น $x = 6$) แสดงให้เห็นถึงความต้านทานของผิวสัมผัสที่มีอยู่เพียง 5 เปอเซ็นต์จากความต้านทานของตัวอย่าง (ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำแบบ 2 ขั้วของตัวอย่างที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกันที่ได้รับการผสม (ในอัตราส่วนที่ระบุ) ของสารละลายกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมไว้กับน้ำ DI.....	51
4.2 (ก) การทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งจากตัวอย่างทั้งหมดเพื่อศึกษาผลการทดลองของการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าและข้างหลังตลอดจนพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอรีซิสซึ่งออกมาเป็นผลลัพธ์ทั้งที่ศบวทและลบของแรงดันไฟฟ้า (ข) ผล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

อนุพันธ์ที่เผยให้เห็นถึงความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากซึ่งมีลักษณะจากการที่กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงให้เห็นจากผลการทดลองการกวาดแรงดันไฟฟ้าในรูป 2ก (ค) ผลการทดลองการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในทิศทางบวกของผลการทดลองในรูป 2ก ที่นำมาพล็อตใหม่ด้วยแบบจำลอง Schottky ($\ln J$ vs \sqrt{E}) และ Poole-Frenkel $\ln J/E$ vs \sqrt{E} (ง) แบบจำลอง FN Tunneling ($\ln I/V^2$ vs $1/V$) ของผลการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในทิศบวกของผลการทดลองในรูป 2ก และ รูปย่อยแสดงให้เห็นถึงแผนภาพของ Distributed tunnel junction network (จ) ภาพขยายของ กราฟความสัมพันธ์ในรูป 2ง ที่เผยให้เห็นจุดเปลี่ยนผันของกลไกการขนส่งพาหะประจุจากแบบจำลอง แบบ Direct tunneling เป็น FN tunneling และรูปย่อยแสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและ แรงดันไฟฟ้าดั้งเดิมที่ช่วยยืนยันแบบจำลอง FN tunneling ในเครื่องหมายสีแดง (ฉ) การวิเคราะห์ ความเข้ากันของผลการทดลองโดยใช้สมการของซิมมอน (Simmon's Formular) และรูปย่อยแสดง ตารางสรุปพร้อมข้อมูลที่พอดีสำหรับค่า A , s and ϕ_B 53

4.3 (ก-ฉ) การทดลองวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าเผยให้เห็นพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่รุนแรงเนื่องจาก แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายสูงขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับการทดลองแต่ละครั้งโดยแต่ละครั้งในการทดลองจะมีความ ล่าช้า 15 นาที่ (ซ) ผลการทดลองของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่นำมาจากรูป (ก-ฉ) ในรูปของ J เทียบ กับ V ในสเกลลอจเพื่อเผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบโอห์มมิกไปเป็นแบบ SCLC (ช) ผลการทดลองจากรูป 4.3ช ในรูปของ $\ln J$ vs. $\ln V$ ในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเพื่อเน้นถึงสาม รูปแบบของกลไกการขนส่ง (Ohmic, SCLC-TF และ Joule-heating ที่ปรับปรุงด้วย SCLC-EDT) (ญ) ผลการทดลองจากรูป 4.3ช ในรูปของ $\ln J$ vs. $\ln 1/E$ เผยให้เห็นว่าไม่มีความเข้ากันที่ชัดเจน สำหรับแบบจำลอง TAT 60

4.4 การให้ความร้อนแบบจูล (การหลอมด้วยกระแส) ทำให้เกิดการปรับปรุงการนำไฟฟ้าอย่างเป็น ระบบซึ่งได้จากตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้รูปแบบการหมุนเวียนของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่าง กัน 64

4.5 (ก-ค) การเกิดวิวัฒนาการชั่วขณะหนึ่งของความต้านทานในตัวอย่างที่ได้จากการทดลองการจ่าย แรงดันไฟฟ้าที่ระบุไว้หลายค่าแบบคงที่..... 65

4.6 การศึกษาการพังทลายของอุปกรณ์โดยการทดลองค่อย ๆ เพิ่มค่าจำกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุด ของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแต่ละครั้งซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพังทลายทางไฟฟ้าของตัวอย่างอย่าง

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
กะทันหันในอุปกรณ์ 2 ชั้นซึ่ง (ก) การจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้า (ข) การจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปข้างหลัง (ค) ภาพถ่ายในขั้นตอนต่าง ๆ ที่นำไปสู่การพังทลายขั้นสุดท้ายสำหรับตัวอย่างในรูป (ก)	67
4.7 กราฟแสดงการทดลองกลไกการขนส่งพาหะประจุของตัวอย่างภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ	69
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำที่ได้ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 80 ถึง 300 เคลวินสำหรับตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แบบก่อน (ก) และหลัง (ข) การหลอมด้วยกระแสไฟฟ้า (ค-ฉ) การวิเคราะห์ผลการทดลองจากรูป 4.8ก และ ข ตามลำดับตามแบบจำลองกฎกำลัง	73





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กราฟีน (graphene) เป็นวัสดุที่มีลักษณะพิเศษจำเพาะที่เรียกว่า วัสดุสองมิติ (2D Materials) ซึ่งในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านการทำวิจัย โดยกราฟีนนั้นมีคุณสมบัติที่น่าทึ่งหลายอย่างด้วยกัน ทั้งคุณสมบัติทางเชิงกล คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติทางไฟฟ้า [1,2] ซึ่งคุณสมบัติที่น่าทึ่งเหล่านี้ทำให้กราฟีนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายสาขา แต่เนื่องจากยังมีขีดจำกัดทางด้านการผลิตและสังเคราะห์กราฟีนให้มีคุณภาพดีและมีปริมาณมากๆ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ยังมีความยุ่งยาก ทำให้การนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมยังไม่เป็นที่นิยม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการศึกษาวิจัยในแนวทางใหม่เกิดขึ้น นั่นก็คือ การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ (graphene oxide: GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (reduced graphene Oxide: rGO) จากกราไฟท์ (graphite) ซึ่งสามารถผลิตได้ง่ายกว่ามากในด้านของจำนวนและขนาด จึงทำให้นำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น แต่ก็ยังมีปัญหาทางด้านคุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ยังไม่มีคุณสมบัติที่เทียบเคียงกับกราฟีน

กราฟีนออกไซด์มีโครงสร้างที่เหมือนกันกับกราฟีนที่มีกลุ่มฟังก์ชันของออกซิเจนเพิ่มเข้ามาในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมของกราฟีน และเนื่องจากกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนนี้เองทำให้กราฟีนออกไซด์เกิดพันธะ sp^3 และช่องว่างของแถบพลังงานจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนดังกล่าวทำให้กราฟีนออกไซด์ไม่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าซึ่งต่างจากกราฟีนที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยม ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาให้เกิดรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ขึ้นจากกระบวนการรีดักชัน (Reduction Process) ผ่านกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ง่าย กล่าวอย่างสรุปก็คือกระบวนการรีดักชันจะทำการกำจัดกลุ่มฟังก์ชันออกไซด์ในกราฟีนออกไซด์ทำให้สลายพันธะ sp^3 ในกราฟีนออกไซด์ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีขนาดลดลงทำให้มีคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นจึงเกิดการศึกษาวิจัยในการเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการต่างๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ให้นำไปใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ (Free-Standing GO Films) ด้วยเทคนิค Vacuum Filtration และนำกราฟีนออกไซด์ที่ได้นี้ไปผ่าน

กระบวนการรีดักชันด้วยความร้อน (Thermal Reduction Process) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดักชันด้วยความร้อนและนำตัวรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นี้ผ่านกระบวนการเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีศักย์สูง (High-bias) เพื่ออาศัยความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่าผลกระทบของการให้ความร้อนจูล (Joule heating effect) ในการรีดักชันรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังศึกษากลไกการขนส่งอิเล็กตรอน (Electrical Transport Mechanism) ผ่านคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุภายใต้ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยทำการทดลองภายใต้ระบบทำความเย็น (Cryostat) ที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม LabVIEW ที่ได้พัฒนาขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระด้วยเทคนิค Vacuum Filtration และ Thermal reduction ศึกษาวิธีการเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้วิธี Electrical reduction และศึกษากลไกการส่งผ่านพาหะประจุของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระด้วยเทคนิค Vacuum Filtration เพื่อให้ได้ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระด้วยความเข้มข้นต่างๆ กัน
2. นำกราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์มาได้ ผ่านเข้าสู่กระบวนการ Thermal Reduction เพื่อให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ฟิล์มที่อยู่ได้อย่างอิสระ (Free-standing rGO films) ที่เงื่อนไขความเหมาะสมแตกต่างกัน
3. นำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้ไปทำเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยนำไปทำขั้วจากแผ่นทองแดงที่ยึดรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับแผ่นทองแดงด้วยกาวเงิน
4. ตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (I-V Characteristic) และศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการ Electrical Reduction โดยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูง (High Bias)
5. ภายหลังจากกระบวนการ Electrical Reduction นำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้ไปตรวจสอบด้วยวิธีรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) เทคนิคการใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราด (Scanning electron Microscope: SEM) และเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

6. ทำการปรับปรุง cryostat และอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในระบบทำความเย็นสำหรับการทดลองภายใต้ปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและทำการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ในภายใต้ระบบนี้เพื่อการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (SMU Unit) ควบคู่กับการควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

7. ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อศึกษากลไกการขนส่งของพาหะประจุใน Cryostat เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเงื่อนไขของอุณหภูมิ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่อจบงานวิจัยนี้แล้วบัณฑิตจะได้รับความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ในการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนาโนสองมิติ รวมถึงขั้นตอนการใช้งาน Cryostat เพื่อศึกษางานที่มีเงื่อนไขเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)											
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1. Literature review												
2. สังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ (Free-standing GO films) ด้วยวิธี Vacuum Filtration												
3. เตรียมฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เองอย่างอิสระด้วย วิธีการ Thermal reduction												
4. วัดคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าและทำการรีดักชั่น ฟิล์มรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่าง อิสระด้วยวิธี Electrical Reduction												
5. วัดคุณลักษณะเฉพาะ ของรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่าง อิสระเทคนิค Raman Spectroscopy, FTIR, AFM และ SEM และ วิเคราะห์ผล												
6. ปรับปรุงระบบ Cryostat และเขียน โปรแกรมLabVIEW ควบคุมการทดลอง												
7. วัดคุณสมบัติการนำ ไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่อุณหภูมิที่ แตกต่างกัน และ วิเคราะห์ผล												
8. จัดเตรียมรายงาน												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

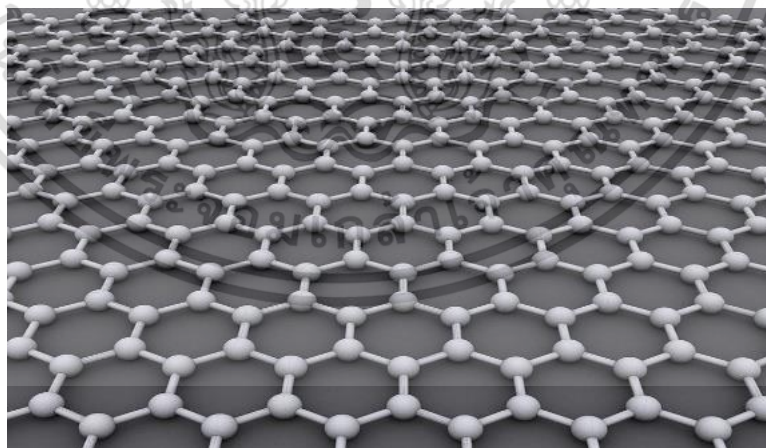
2.1 กราฟีน (Graphene)

กราฟีน คือ อะตอมของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวกันเป็นระนาบเดียวโดยการจับตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งแผ่ขยายออกไปในลักษณะ 2 มิติ [1,2] โดยที่กราฟีนนั้นเป็นโครงสร้างหลักของสารประกอบคาร์บอนตัวอื่นๆ ที่ประกอบด้วย กราไฟท์ (Graphite) ชาร์โคล (Charcoal) คาร์บอนนาโนทิว (Carbon-nanotube) และฟูลเลอร์รีน (Fullerene) นอกจากนี้กราฟีนนั้นมีความแข็งแรงที่แตกต่างจากของคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นแล้วจะแข็งแรงกว่าเหล็กที่แข็งแรงที่สุดประมาณ 100 เท่า โดยในขณะที่ความหนาแน่นของตัวกราฟีนนี้ต่ำกว่าเหล็กอย่างมาก โดยมีความหนาแน่น 0.763 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร อีกทั้งยังเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและมีลักษณะที่เกือบจะโปร่งใสและกราฟีนยังแสดงให้เห็นถึงความเปราะบางที่ผิดปกติ (Diamagnetic) ขนาดใหญ่และไม่เป็นเชิงเส้น จนกระทั่งดีกว่ากราฟไฟท์ในขนาดเท่ากัน และสามารถลอยได้ด้วยแรงแม่เหล็กจาก NdFeB [5] จากรูปที่ 1 ซึ่งแสดงภาพวาดโครงข่ายอะตอมของคาร์บอน โดยวัตถุทรงกลมแทนอะตอมของคาร์บอน ส่วนเส้นตรงสั้นๆ ที่เชื่อมต่อกันของคาร์บอนทั้งหลายเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายแทนพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอน จะเห็นว่าอะตอมของคาร์บอนตัวหนึ่งๆ มีพันธะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนอื่นอีก 3 ตัวด้วยพันธะแบบโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก หรือกล่าวได้ว่ามี 3 พันธะโควาเลนต์ต่อ 1 อะตอมของคาร์บอน (แทนที่จะเป็น 4 พันธะต่อหนึ่งอะตอมเหมือนอย่างโครงสร้างของเพชร) ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่บนแผ่นกราฟีน (2 มิติ) ได้อย่างอิสระ และเนื่องจากพันธะที่มีความแข็งแรงและสั้นมากนี่เองที่ทำให้วัสดุ 2 มิติอย่างกราฟีนมีเสถียรภาพที่คงตัวอยู่ได้

กราฟีนมีคุณสมบัติเด่นหลายประการที่ทำให้ได้รับการยกย่องว่าเป็นวัสดุมหัศจรรย์ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือเป็นวัสดุที่แข็งแรงมากดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นซึ่งมีความต้านแรงดึงสูงถึง 130×10^9 ปาสคาล (ในขณะที่เหล็กกล้ามีค่า 400×10^6 ปาสคาล) อีกทั้งยังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยมทั้งนี้เพราะอะตอมของคาร์บอนที่เป็นธาตุหมู่ 4 ในตารางธาตุมีอิเล็กตรอน 6 ตัว สองตัวแรกจะอยู่ใกล้นิวเคลียสและอีก 4 ตัวที่เหลืออยู่ที่บริเวณด้านนอกที่ห่างออกมาซึ่งอิเล็กตรอนทั้ง 4 ตัวนี้มีความสามารถที่จะทำพันธะกับอะตอมตัวอื่นๆ ซึ่งกราฟีนนั้นอะตอมของคาร์บอน 1 ตัวจะมีพันธะกับอะตอมของคาร์บอนอีก 3 ตัวในระนาบ 2 มิติ ดังนั้นจึงเหลือคาร์บอนอีก 1 ตัวในมิติที่ 3 (ด้านบนหรือด้านล่างของระนาบ 2 มิติ) เรียกว่า π อิเล็กตรอนที่ไม่มีพันธะกับใครจึงสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระซึ่งพบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในกราฟีนมีค่าไม่ต่ำกว่า $15,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (เมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงที่มีค่า 30 cm^2) และในขณะเดียวกันยังเป็นตัวนำความร้อนที่ยอดเยี่ยมเช่นกันโดยมีค่าความนำความร้อนประมาณ $2500 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ มีค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวปริมาตรที่สูงมาก นั่นคือจะบอกได้ว่ากราฟีนนั้นเป็นแผ่นที่บางมากๆ และด้วยเหตุผลนี้เองกราฟีนจึงโปร่งใสมาก แต่ถึงแม้จะบางมากกลับมีความสามารถในการดูดกลืนแสงขาวได้สูงถึง 2.3 เปอร์เซ็นต์อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนอิสระในกราฟีนที่ส่งผลให้กราฟีนแตกต่างจากเพชรที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเลยจึงดูดกลืนแสงได้น้อยกว่านอกเสียจากว่าโฟตอนของแสงนั้นจะมีพลังงานสูงมากพอ และกราฟีนนี้เองเป็นวัสดุที่เบามากโดยขนาดพื้นที่ 1 ตารางเมตรกราฟีนจะมีน้ำหนักเพียง 0.77 มิลลิกรัม คุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมอีกอย่างหนึ่งของกราฟีนคือไม่เป็นพิษกับร่างกายมนุษย์แถมมีฤทธิ์ป้องกันการก่อตัวของแบคทีเรียได้ ทำให้กราฟีนหรือวัสดุที่มีการพินเป็นส่วนประกอบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายมาก [6,7]

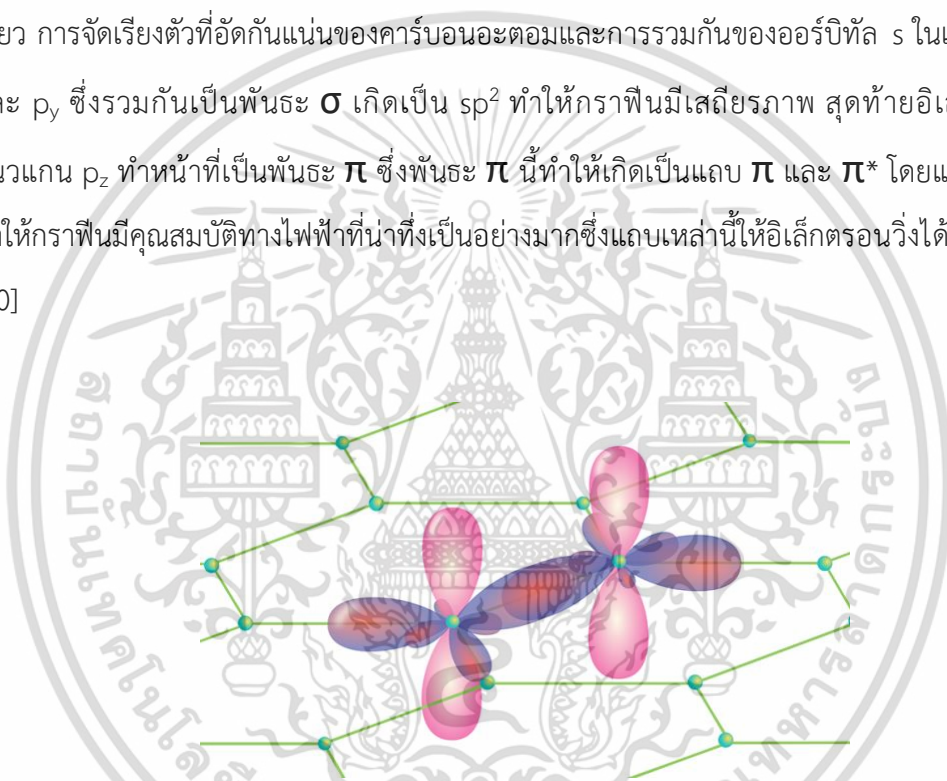
ตั้งแต่ช่วงปี 2007 เรื่อยมาจนถึงปัจจุบันได้มีการปลูกกราฟีนที่มีความหนาชั้นเดียวลงบนวัสดุอื่น โดยกราฟีนที่ถูกปลูกขึ้นมาประกอบด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมของอะตอมของคาร์บอนที่มีพันธะแบบ sp^2 ในลักษณะที่เป็นกราฟีนอิสระ (Free standing graphene) อย่างไรก็ตามจะมีการถ่ายโอนประจุจากซับสเตรทไปยังตัวกราฟีนที่ถูกปลูกนี้และในบางกรณีจะเกิดการรวมกันระหว่าง d ออร์บิทัลของอะตอมของซับสเตรทกับ π ออร์บิทัลของกราฟีนซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางไฟฟ้าของกราฟีนที่ถูกปลูกลงบนวัสดุอื่นที่เป็นซับสเตรท [8]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราฟีน

2.1.1 โครงสร้างกายภาพ

กราฟีนเป็นผลึกอัญรูปของคาร์บอนอะตอมที่จัดเรียงตัวกันโดยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ 2 มิติซึ่งคาร์บอนอะตอมนี้จะจัดเรียงกันเป็นรูป 6 เหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง แต่ละอะตอมของคาร์บอนจะมีพันธะ 4 พันธะด้วยกันหนึ่งในนั้นคือ พันธะ σ ที่ทำพันธะกันกับอะตอมเพื่อนบ้านอีก 3 ตัวในขณะที่พันธะสุดท้าย พันธะ π ที่อยู่นอกระนาบ 2 มิติโดยอะตอมของคาร์บอนจะอยู่ห่างกันประมาณ 1.42 อังสตรอม [9] ผลึกกราฟีนที่เป็นรูปหกเหลี่ยมนี้จะเสมือนว่าเกิดจากการรวมกันของรูปสามเหลี่ยมสองรูปโดยการมองในรูปแบบนี้ถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณโครงสร้างของกราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียว การจัดเรียงตัวที่อัดกันแน่นของคาร์บอนอะตอมและการรวมกันของออร์บิทัล s ในแนวแกน p_x และ p_y ซึ่งรวมกันเป็นพันธะ σ เกิดเป็น sp^2 ทำให้กราฟีนมีเสถียรภาพ สุดท้ายอิเล็กตรอนในแนวแกน p_z ทำหน้าที่เป็นพันธะ π ซึ่งพันธะ π นี้ทำให้เกิดเป็นแถบ π และ π^* โดยแถบเหล่านี้ที่ทำให้กราฟีนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าทึ่งเป็นอย่างมากซึ่งแถบเหล่านี้ให้อิเล็กตรอนวิ่งได้อย่างอิสระ [10]



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมในกราฟีนในแนวแกน p_x , p_y และ p_z

แผ่นกราฟีนที่อยู่ในรูปของของแข็งมักจะแสดงให้เห็นการเลี้ยวเบนในชั้นของกราฟีน (002) ซึ่งนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง SWNT (Single-walled nanostructure) [11] อย่างไรก็ตาม การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงให้เห็นถึงข้อบกพร่องในผลึกของกราฟีน กราฟีนสามารถซ่อมแซมรูที่เกิดขึ้นได้ในตัวเองเมื่อสัมผัสกับโมเลกุลที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น ไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยาของคาร์บอนบริสุทธิ์อะตอมจะเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมที่เติมเต็มช่องโหว่จากหลุมอย่างสมบูรณ์ [12] ศึกษาโครงสร้างอะตอมของกราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวด้วย TEM บนแผ่นกราฟีนรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงโครงตาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข่ายรังผึ้งดั่งที่คาดหวัง [13] นอกจากนี้แผ่นกราฟีนยังแสดงให้เห็นถึงระลอกคลื่นที่มีแอมพลิจูด 1 นาโนเมตรของกราฟีนแผ่นเรียบโดยระลอกคลื่นเหล่านี้อาจเป็นเนื้อแท้กับวัสดุอันเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของผลึกในระนาบ 2 มิติหรืออาจเกิดจากสิ่งสกปรกบนแผ่นกราฟีนที่เห็นจากภาพที่ถ่ายได้โดย TEM

2.1.2 คุณสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

กราฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับศูนย์เนื่องจากแถบตัวนำและแถบวาเลนซ์จะมาพบกันที่จุดดิแรค (Dirac-point) โดยที่จุดดิแรคนั้นมีอยู่ 6 ตำแหน่งในพื้นที่ของโมเมนตัม (Momentum) ในขอบเขตของ Brillouin zone แบ่งออกเป็น 2 ชุดที่ไม่เท่ากัน ชุดละสามจุดแทนด้วยตัวอักษร K และ K' ซึ่งแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิมทั่วไปที่มีค่าโมเมนตัมเท่ากับศูนย์ ซึ่งคุณสมบัตินี้เองของกราฟีนที่แยกมันออกจากวัสดุชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามหากทิศทางของระนาบถูกจำกัดให้มีจุดสิ้นสุด โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีนจะเปลี่ยนไปซึ่งจะถูกเรียกว่า กราฟีนนาโนริบบอนแทน ถ้าเป็นในรูปแบบซิกแซกช่องว่างแถบพลังงานจะยังคงมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าเป็นแบบอาร์มแชร์จะไม่เท่ากับศูนย์ [9]

อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านผลึกกราฟีนที่มีลักษณะเป็นเครือข่ายรังผึ้งนั้นจะเกิดการสูญเสียมวลซึ่งจะเกิดเป็นอนุภาคกึ่งเสมือน [14,15] (quasi) ที่อธิบายโดยแบบจำลอง 2 มิติของสมการชโรดิงเงอร์สำหรับอนุภาคสปิน -1/2 เมื่ออะตอมถูกวางลงบนผลึกหกเหลี่ยมของกราฟีนจะเกิดการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัล $p_z (\pi)$ กับออร์บิทัล p_x โดยที่ออร์บิทัล p_y มีค่าเท่ากับศูนย์ อิเล็กตรอนในแนวแกน p_z จะสร้างแถบ π ขึ้นในกราฟีนโดยแถบนี้เองจะประมาณค่าโดยใช้แบบจำลอง conventional tight-binding ดังนั้น dispersion relation (จำกัดเฉพาะที่มีปฏิสัมพันธ์กับอะตอมเพื่อนบ้านเท่านั้น) ที่ให้พลังงานของอิเล็กตรอนออกมาในรูปของ wave vector k [16,17] ดังแสดงในสมการ

$$E = \pm \sqrt{\gamma^2 \left(1 + 4 \cos^2 \frac{k_y a}{2} + 4 \cos \frac{k_y a}{2} \cdot \cos \frac{k_x \sqrt{3} a}{2}\right)} \quad (1)$$

โดยพลังงานที่ได้จากการหอบังมีค่าประมาณ 2.8 อิเล็กตรอนโวลต์และมีค่าคงที่แลคทีสเท่ากับ 2.46 อังสตรอม แถบนำและแถบวาเลนซ์จะสอดคล้องกับสัญญาณที่แตกต่างกันโดยอิเล็กตรอนในแนวแกน p_z หนึ่งตัวต่อหนึ่งอะตอมนั้น แถบวาเลนซ์จะถูกเติมจนเต็มในขณะที่แถบวาเลนซ์จะยังว่างอยู่ แถบที่ว่ามาทั้งสองแถบนี้จะสัมผัสกับที่ตรงมุมของพื้นที่ (จุด K ใน Brillouin zone) กราฟีนจึงแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

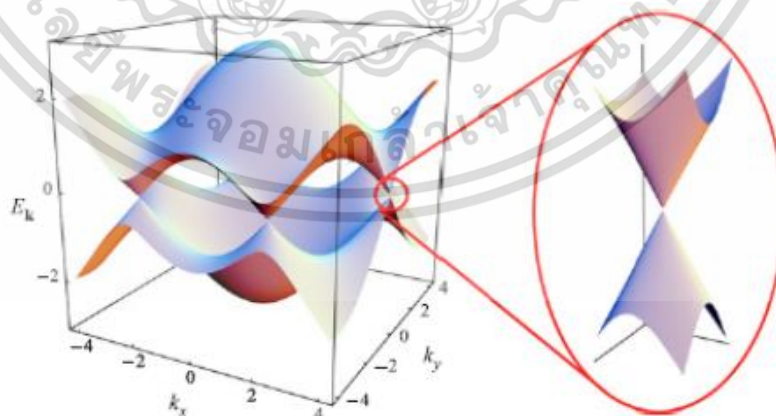
ลักษณะที่เป็นวัสดุกึ่งโลหะ (หรือสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับศูนย์) โดยสองในหกจุดดิแรคนั้นจะไม่ขึ้นกับค่าอื่น ณ จุดดิแรคที่เหลือจะเทียบเท่ากันด้วยสมมาตร ในบริเวณใกล้เคียงจุด K พลังงานจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่า wave vector [9,18] เนื่องจากเซลล์ปฐมภูมิของแลคทิสมีอะตอมพื้นฐาน 2 อะตอมจึงมีโครงสร้างแบบ 2 สปินเซอร์ที่มีประสิทธิภาพด้วยเหตุนี้เองในย่านที่พลังงานต่ำแม้จะละเลยการหมุนของสปิน อิเล็กตรอนก็ยังคงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดิแรค ดังนั้นอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกเรียกว่าดิแรคเฟอร์มิออน (Dirac Fermion) [9,19]

$$v_F \vec{\sigma} \cdot \nabla \varphi(\mathbf{r}) = E \varphi(\mathbf{r}). \quad (2)$$

จากสมการนี้ v_F มีค่าประมาณ 10^6 เมตรต่อวินาทีคือความเร็วเฟอร์มิโนในกราฟีนซึ่งแทนที่ความเร็วแสงในทฤษฎีดิแรค คือเวกเตอร์ของเพาลีเมทริก คือส่วนประกอบของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนและ E คือ พลังงาน [14] และสมการต่อไปนี้จะอธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอิเล็กตรอนกับ dispersion relation

$$E = \hbar v_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (3)$$

โดยที่ เวกเตอร์คลื่น K วัดจากจุดดิแรค (ที่จุดนี้จะถูกเลือกให้พลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์) [18]



รูปที่ 2.3 รูปแสดงความสัมพันธ์ของ Dispersion Relation และภาพขยายแถบพลังงานที่จุดดิแรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การขนส่งอิเล็กตรอน

กราฟีนแสดงให้เห็นค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้าอย่างน่าทึ่งมากที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีค่าประมาณ $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ โดยที่ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลคาดว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ความคล่องตัวของพาหะนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10K ถึง 100K ซึ่งบอกเป็นนัยว่ากลไกการกระเจิงที่โดดเด่นคือการกระเจิงจากข้อบกพร่องของผลึก การกระเจิงโดยอะคูสติกโฟนอน (Acoustic Phonon) ของภายในกราฟีนนั้นจะจำกัดความคล่องตัวที่อุณหภูมิห้องมีค่าถึง $200000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [1, 21-23] ที่ค่าความหนาแน่นของพาหะประจุมีค่าเท่ากับ 10^{12} cm^{-2} ซึ่งดีกว่าทองแดงถึงล้านเท่า ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความต้านทานของแผ่นกราฟีนจะมีค่า 10^{-6} โอห์มเซนติเมตร ซึ่งค่าความต้านทานของกราฟีนนี้มีค่าน้อยกว่าเงินและมีค่าต่ำที่สุดที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามบนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เป็นซับสเตรตการกระเจิงของอิเล็กตรอนโดยแสงโฟนอนของซับสเตรต (Substrate) จะใหญ่กว่าผลกระทบจากการกระเจิงโดยโฟนอนของกราฟีนเองซึ่งทำให้ค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้ามีค่า $40000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [22]

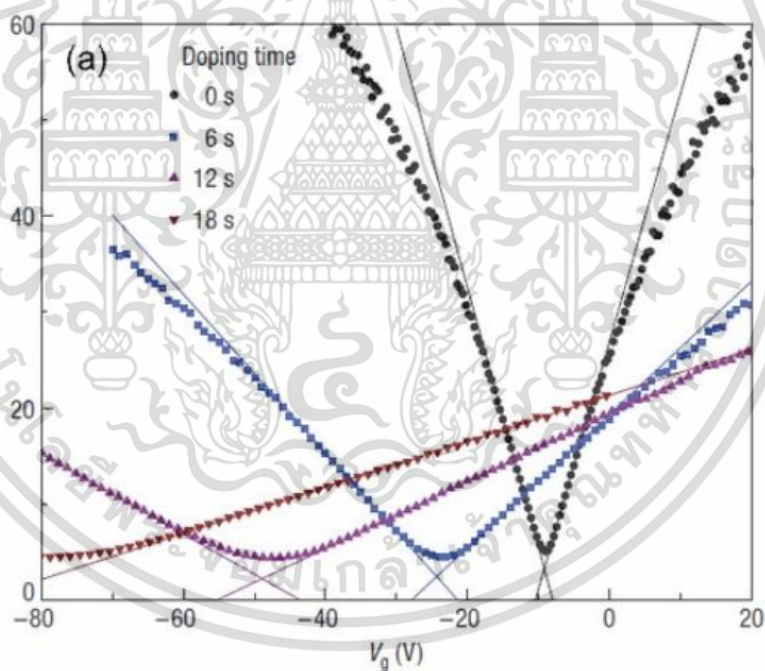
การเคลื่อนที่ของพาหะประจุจะเกิดการปนเปื้อนจากการดูดซับ เช่น น้ำและโมเลกุลของออกซิเจน ซึ่งสิ่งนี้เองนำไปสู่คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ I-V ที่มีลักษณะเป็น hysteresis และมีขนาดใหญ่ ความต้านทานไฟฟ้าของกราฟีนนาโนริบบอนที่มีความกว้างของริบบอน 40 นาโนเมตรซึ่งผลที่ได้มานั้นค่าความนำไฟฟ้าของกราฟีนนาโนริบบอนมีค่ามากกว่าการคาดการณ์ถึง 10 เท่า ซึ่งริบบอนนี้สามารถทำหน้าที่เสมือนท่อนำคลื่นแสงหรือจุดควอนตัมซึ่งช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับทองแดงนั้นความต้านทานของทองแดงจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนความยาวเมื่ออิเล็กตรอนพบกับสิ่งปนเปื้อนในทองแดง [24,25]

กลไกการขนส่งอิเล็กตรอนของกราฟีนนั้นมักจะถูกครอบงำด้วย 2 ลักษณะที่แตกต่างกัน หนึ่งคือแบบบอลลิสติกที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะที่อีกแบบหนึ่งคือการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน [25]

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในกราฟีนนั้นสามารถเคลื่อนที่ครอบคลุมระยะทางไมโครเมตรโดยไม่เกิดการกระเจิงแม้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง [14] และแม้จะมีความหนาแน่นของพาหะประจุมีค่าเท่ากับศูนย์ในจุดที่ใกล้กับจุดดิแรค กราฟีนจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่น้อยที่สุดซึ่งเหตุผลที่ว่าทำไมการนำไฟฟ้าถึงมีค่าน้อยที่สุดนั้นยังไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามการเกิดคลื่นบนแผ่นกราฟีนหรือสิ่งปนเปื้อนจากการไอออไนซ์ในซิลิกอนไดออกไซด์ที่เป็นซับสเตรตซึ่งจะนำไปสู่ค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในที่สุด มีหลายทฤษฎีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของกราฟีนควรมีค่าเป็น $4e^2/\pi h$ แทนที่จะเป็น $4e^2/h$ [1,15,26]

ที่ค่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์กราฟินจะแสดงให้เห็นถึงค่าความนำแสงที่เป็นบวกและเป็นลบเมื่อมีค่าความหนาแน่นของพาหะที่สูงขึ้น สิ่งนี้อยู่ภายใต้อิทธิพลซึ่งกันและกันระหว่างการเปลี่ยนแปลงการเหนี่ยวนำแสงของทั้งน้ำหนักครูดและอัตราการกระเจิงของพาหะประจุ

กราฟินที่ถูกโด๊ปด้วยก๊าซชนิดต่างๆ (ทั้ง donor และ acceptor) สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมเป็นกราฟินบริสุทธิ์ที่ไม่มีการเจือปนด้วยการให้ความร้อนอ่อนๆ ที่สุญญากาศ [27] แม้กระทั่งการโด๊ปด้วยสารเจือที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10^{12} cm^{-2} ค่าความคล่องตัวของพาหะประจุก็ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน ในขณะที่เดียวกันกราฟินที่ถูกเจือด้วยโพแทสเซียมในสถานะที่มีสุญญากาศสูงมากและอุณหภูมิต่ำทำให้ค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้าของกราฟินลดลงไปได้มากถึง 20 เท่า [28] โดยการลดค่าความคล่องตัวนี้สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อให้ความร้อนแก่กราฟินเพื่อกำจัดโพแทสเซียมเนื่องจากความเป็น 2 มิติของกราฟินนี้เองทำให้เกิดการแยกส่วนของประจุไฟฟ้าซึ่งทำให้กราฟินเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัมโดยใช้วงจรถเฉพาะ [29]



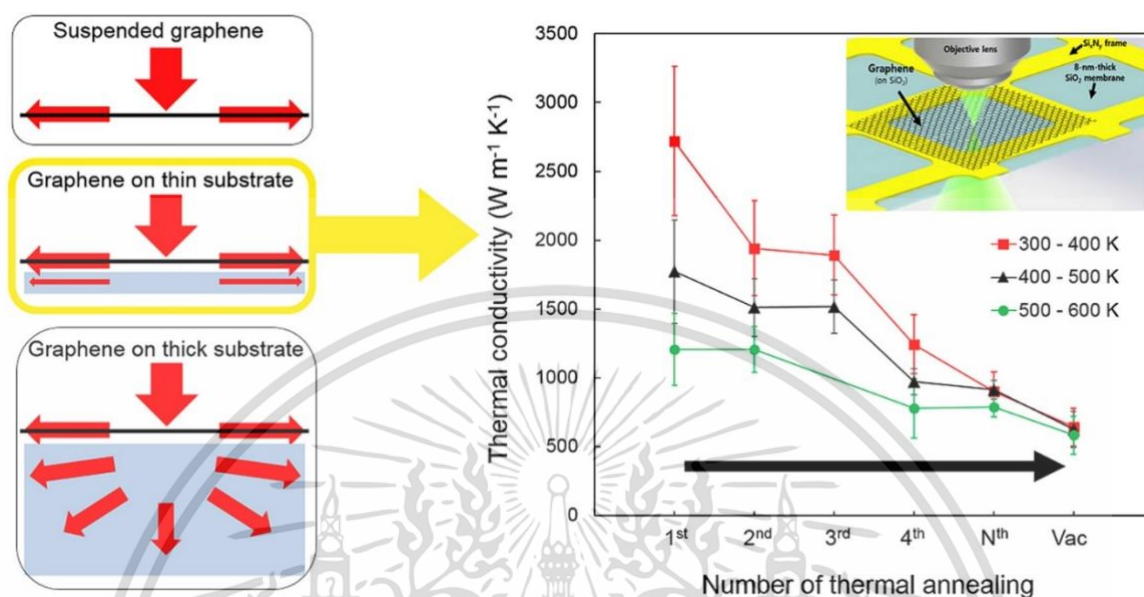
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงตัวอย่างคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเทียบแรงดันเกตของกราฟินที่ไม่ผ่านการโด๊ป (เส้นสีดำ) และกราฟินที่ทำการโด๊ปด้วยโพแทสเซียม

2.1.4 คุณสมบัติการนำความร้อน

การส่งถ่ายความร้อนในกราฟีนเป็นพื้นฐานของการวิจัยมากมายเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในช่วงแรกการวัดค่าการนำความร้อนของกราฟีนจะได้ค่าประมาณ 5300 W/m·K [30] อย่างไรก็ตามยังมีการตั้งคำถามอยู่ว่าค่าที่สูงเกินความเป็นจริงนี้มีการประเมินค่าสูงเกินไปหรือไม่และได้มีการวัดค่าการนำความร้อนของกราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวซึ่งผลที่ได้คือได้ค่าการนำความร้อนในหลายๆช่วงแทน (อยู่ในช่วง 1500-2500 W/m·K) [31-34] ซึ่งระบุว่าอาจเกิดจากความไม่แน่นอนการวัดรวมถึงคุณภาพของกราฟีนที่นำมาใช้ในการวัดนอกจากนี้ยังเป็นที่ทราบกันว่าเมื่อกราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวไปอยู่บนวัสดุที่เป็นอสัณฐานค่าการนำความร้อนจะลดลงเหลือเพียง 500-600 W/m·K ที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากการกระเจิงของกราฟีนที่เกิดขึ้นจากซับสเตรต [35,36] ในทำนองเดียวกันกับโพลีเมอร์ซึ่งจะลดค่าความนำความร้อนกราฟีนให้มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุที่เป็นอสัณฐาน [37]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่บ่งบอกว่าองค์ประกอบของคาร์บอนอะตอมในกราฟีนที่มีอัตราส่วนไอโซโทปของคาร์บอน 12 และ 13 มีผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนของกราฟีนซึ่งแสดงให้เห็นด้วยกฎ Wiedemann – Franz ว่าการนำความร้อนของกราฟีนนั้นถูกควบคุมด้วยโฟนอน [38] อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำความร้อนที่สูงของกราฟีนสามารถมองเห็นได้จากกราฟไฟท์ซึ่งอาจจะบอกได้ว่าเป็นกราฟีนในรูปแบบ 3 มิติที่โดยพื้นฐานมีค่าการนำความร้อนมากกว่า 1000 W/m·K โดยในกราฟไฟท์นั้นค่าการนำความร้อนของแกน c (ซึ่งไม่อยู่ในระนาบ) นั้นมีค่าน้อยกว่าประมาณ 100 เท่าเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนระหว่างระนาบและระยะห่างระหว่างแลตทิสที่เพิ่มมากขึ้น [39] แม้ในธรรมชาติกราฟีนจะเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบ 2 มิติแต่กราฟีนก็ยังคงมีอะคูสติคโฟนอน 3 โหมด โดยสองโหมดที่อยู่ในระนาบนั้น (LA, TA) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ dispersion relation ในขณะที่โหมดที่อยู่นอกระนาบนั้นมีความสัมพันธ์แบบยกกำลังสอง เนื่องจาก T^2 ขึ้นอยู่กับการนำความร้อนของกราฟีนสำหรับโหมดเชิงเส้นจึงเป็นลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและ $T^{1.5}$ สำหรับโหมดที่อยู่นอกระนาบ [39] โดยบางแถบโฟนอนของกราฟีนแสดงพารามิเตอร์ของค่า Geineisen ที่เป็นลบและที่อุณหภูมิต่ำ (ซึ่งในโหมดทางแสงส่วนใหญ่ที่มีค่า Geineisen และยังคงไม่ถูกกระตุ้น) ผลจากค่าที่เป็นลบจะมีลักษณะเด่นกว่าและยังมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Geineisen ที่เป็นลบ) โดยค่าเป็นลบที่จะสอดคล้องกับโหมด ZA ที่มีค่าต่ำที่สุด โดยที่ความถี่ของโฟนอนสำหรับโหมดดังกล่าวนี้จะเพิ่มขึ้นในระนาบของแลตทิสเนื่องจากอะตอมในชั้นที่เกิดการยึดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังทิศทาง z โดยพฤติกรรมนี้จะคล้ายกับสตริงคือเมื่อยึดออกจะมีการสั่นสะเทือน

ของแอมพลิจูดที่มีขนาดเล็กและมีความถี่สูงซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า membrane effect [40,41]



รูปที่ 2.5 กราฟตัวอย่างแสดงคุณสมบัติการนำความร้อนของกราฟีนในซับสเตรทที่มีความหนาแตกต่างกัน

2.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราะห์กราฟีนนั้นหมายถึงวิธีการใดๆ สำหรับการผลิตหรือสกัดกราฟีนซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของกราฟีนที่ต้องการหรือความบริสุทธิ์ [42] ในช่วงก่อนหน้านี้นั้นมีการค้นพบเทคนิคต่างๆ ในการผลิตฟิล์มบางของกราฟไฟท์ ในตอนเริ่มแรกคาร์บอนตกตะกอนเป็นฟิล์มบางบนผิวของโลหะทรานซิชัน ต่อมากราฟไฟท์ที่มีความหนาไม่กี่ชั้นได้รับการสังเคราะห์ขึ้นบนพื้นผิวของแพลตฟอร์มที่เป็นผลึกเดี่ยวด้วยวิธีการสลายตัวทางเคมี แต่ยังไม่ถูกกำหนดให้เป็นกราฟีนเนื่องจากขาดเทคนิคการจำแนกลักษณะ โดยในช่วงเวลาดังกล่าวคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุจำพวกนี้ไม่เคยได้รับการตรวจสอบเนื่องจากความยากลำบากในการถ่ายโอนไปยังซับสเตรทที่เป็นฉนวน แต่ต่อมาได้มีการพยายามแยกสะเก็ดกราฟไฟท์ที่มีความบางมากๆ บนพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์โดยการถูไปบน HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) [43] อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในยุคนั้น แต่ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วที่แท้จริงในการวิจัยกราฟีนเริ่มขึ้นจากการแยกกราฟีนบนพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์และทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิค

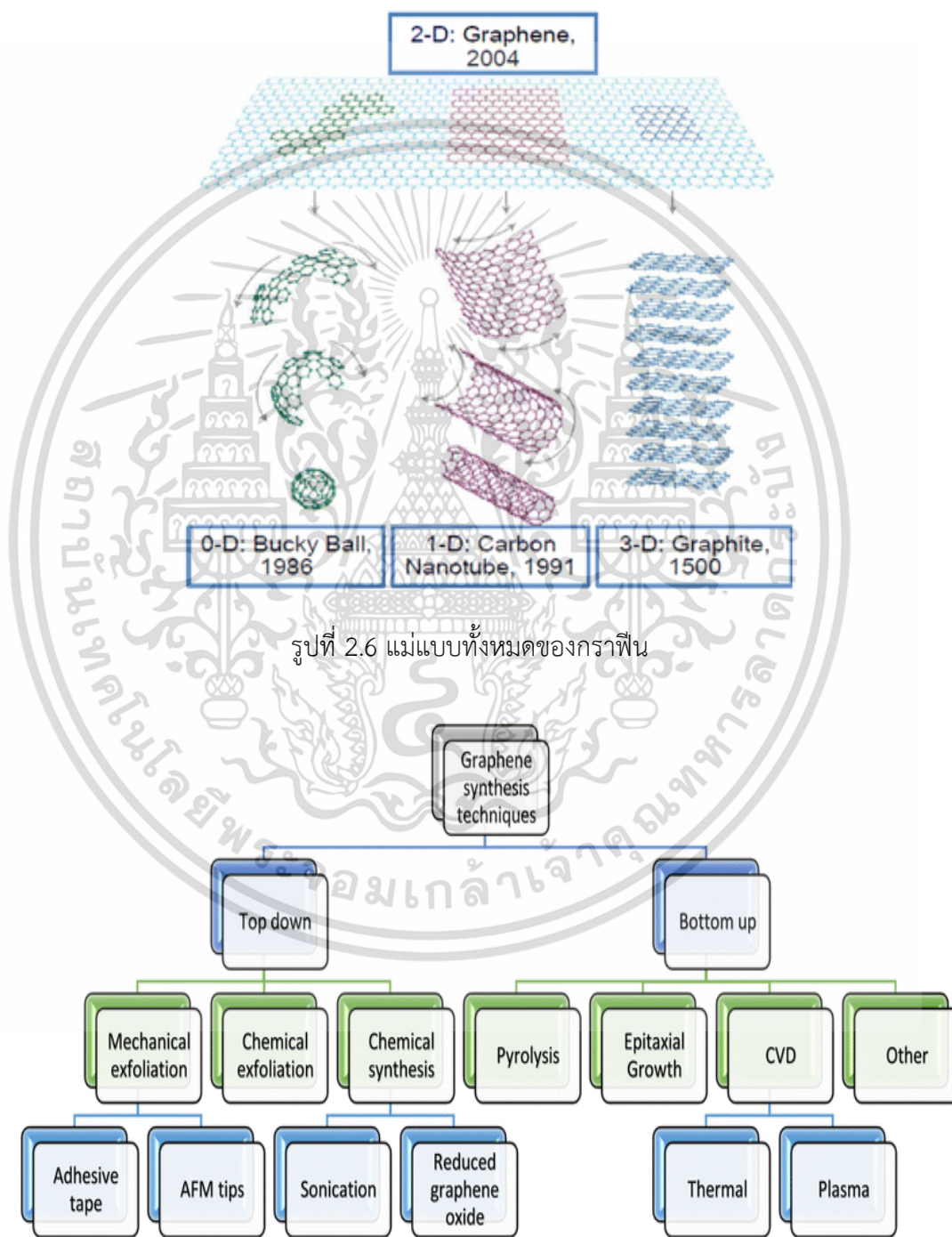
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ เพื่อผลิตฟิล์มบางของกราฟไฟท์และกราฟีน มีหลักฐานในการทดลองตั้งแต่ปี 2004 [44] และ 2005 [45] ของผลึก 2 มิติของผลึกกราฟีนและวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์, นิโอเบียมไดเซเลไนต์และเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ซึ่งมีการถูกลอกขึ้นครั้งแรกเป็นจำนวนมาก แต่กราฟีนที่สังเคราะห์ได้ครั้งแรกในรูปแบบของสะเก็ดเล็กๆ ในหน่วยไมครอนหลายๆ อันผ่านการเอ็กซ์โฟลิเอตกราฟไฟท์โดยใช้สก็อตเทป [46,47] แม้ว่าวิธีนี้จะให้กราฟีนที่มีคุณภาพสูงที่สุดแต่สำหรับการผลิตขึ้นมาเป็นจำนวนมากนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากจึงต้องสังเคราะห์กราฟีนให้ได้ในระดับรูปแบบเวเฟอร์

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีเทคนิคมากมายที่เกิดขึ้นสำหรับการสังเคราะห์กราฟีน อย่างไรก็ตาม การวิธีการเอ็กซ์โฟลิเอตเชิงกล [44], เอ็กซ์โฟลิเอตทางเคมี [48,49], การสังเคราะห์ทางเคมี [50] และวิธีการ CVD (Chemical vapor deposition) [51] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากในปัจจุบัน และยังมีอีกวิธีที่ได้อีกในปัจุบันแต่ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เช่น การคลายเกลียวนาโนทิวบ์ [52-54] และการสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ [55] แม้ว่าการลอกเชิงกลนั้นสามารถผลิตกราฟีนที่มีความหนาแน่นน้อยๆ ได้แต่วิธีการนี้จะมีข้อจำกัดคือความหนาของกราฟีนจะแปรผันประมาณ 10 นาเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนที่มีความหนา 30 ชั้น และในส่วนการลอกเชิงเคมีนั้นสารละลายกราฟไฟท์จะถูกลอกโดยจะทำการใส่ไอออนอัลคาไลขนาดใหญ่ระหว่างชั้นของกราฟไฟท์ การสังเคราะห์ทางเคมีนั้นเป็นกระบวนการที่มีลักษณะคล้ายกันซึ่งประกอบไปด้วยการสังเคราะห์กราฟไฟท์ออกไซด์ที่กระจายตัวในรูปสารละลายตามด้วยการรีดักชันด้วยการใช้ไฮดราซีน สำหรับการเร่งปฏิกิริยาทางความร้อนด้วยเทคนิค CVD นั้นได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์กราฟีนได้ในสเกลขนาดใหญ่ เมื่อกระบวนการ CVD เชิงความร้อนทำการดำเนินการภายใต้เตาหลอมและเมื่อวิธีการนี้ใช้พลาสมาเข้ามาช่วยในการปลูกฟิล์มจะเรียกว่าเทคนิค PECVD แต่วิธีการสังเคราะห์ทั้งหมดนั้นจะมีข้อบกพร่องบางประการเช่นกันโดยขึ้นอยู่กับวิธีประยุกต์ใช้กราฟีนในขั้นตอนสุดท้าย ยกตัวอย่างเช่น วิธีการลอกเชิงกลนั้นสามารถสังเคราะห์กราฟีนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียว (Monolayer Graphene) ถึงกราฟีนที่มีความหนาเพียงเล็กน้อย (Few-layer Graphene) แต่ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างของกราฟีนที่คล้ายกันนี้ได้จากการใช้วิธีนี้ค่อนข้างจะต่ำ นอกจากนี้วิธีการทางเคมีนั้นยังเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำซึ่งทำให้เกิดความระมัดระวังในการสร้างกราฟีนบนพื้นผิวหลายประเภทที่ทำได้ในอุณหภูมิห้องโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนพื้นผิวของโพลีเมอร์ แต่กระบวนการนี้ไม่สามารถสังเคราะห์กราฟีนที่มีขนาดใหญ่ได้โดยผลผลิตที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและแยกออกจากกันและหากนำไปรีดักชันรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่ได้จะไม่สมบูรณ์ส่งผลให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ลดลงอันเนื่องมาจากการรีดักชัน ในทางตรงกันข้ามวิธีการ CVD นั้นมีประโยชน์อย่างมากในการผลิตกราฟีนเป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่และวิธีการนี้เองยังเป็นที่ยอมรับอย่างมาก

สำหรับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (CMOS) [56] ซึ่งใช้แทนซิลิกอนได้ในอนาคตโดยข้อจำกัดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กีดขวางวิธีการนี้ก็คือใช้อุณหภูมิสูงและไม่สามารถถ่ายโอนกราฟีนไปบนพื้นผิวอื่นได้ ดังนั้นวิธี CVD จึงมีความร้อนจึงมีความพิเศษเนื่องจากการสังเคราะห์ผลผลิตที่เป็นชั้นของอะตอมคาร์บอนที่ถูกเร่งด้วยปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งสามารถนำไปปลูกบนพื้นผิวโลหะหรือพื้นผิวอื่นๆ หลายประเภท ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าวิธีการสังเคราะห์กราฟีนในรูปแบบต่างๆ นั้นมีหลากหลายวิธีดังแสดงในรูปแบบที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสังเคราะห์กราฟีนในปัจจุบันที่มีมากมายหลายวิธีนั้น โดยหลักๆแล้วจะแบ่งวิธีการสังเคราะห์กราฟีนได้ออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ ก็คือ การสังเคราะห์กราฟีนจากบนลงล่าง (Top down) และอีกวิธีหนึ่งก็คือการสังเคราะห์กราฟีนจากล่างขึ้นบน (Bottom up) ซึ่งในแต่ละแบบก็แยกย่อยออกเป็นแต่ละวิธีที่ต่างกันซึ่งนำไปสู่การใช้งานกราฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ต่างกันอีกทั้งยังมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันด้วยในแต่ละวิธี (ตารางที่ 1 และ 2) โดยปัจจัยที่สนใจและบ่งบอกว่ากราฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ต่างกันนั้นให้คุณภาพในเชิงที่แตกต่างก็ซึ่งปัจจัยที่ว่านี้ได้แก่ความหนาและจำนวนชั้นกราฟีนที่สังเคราะห์ได้รวมถึงขนาดที่ได้ที่ใหญ่เล็กแตกต่างกันตามแต่ละวิธีอีกทั้งคุณสมบัติของพื้นผิวและคุณภาพที่ได้ก็ยังคงแตกต่างกันอีกด้วยตัวอย่างเช่น กระบวนการสังเคราะห์กราฟีนแบบบนลงล่างด้วยวิธีการลอกเชิงกลโดยวิธีจะทำให้ได้กราฟีนที่ไม่สามารถระบุจำนวนชั้นได้แน่นอนแต่จะสามารถสังเคราะห์กราฟีนได้ขนาดใหญ่มากในระดับเซนติเมตรแต่คุณภาพของกราฟีนที่ได้จะไม่สามารถระบุได้แน่ชัดและยังสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่ไม่มาก [42]

ตารางที่ 2.1 วิธีสังเคราะห์กราฟีนจากบนลงล่าง

Method	Typical dimension		Advantage	Disadvantage
	Thickness	Lateral	Directly from graphite	
Micromechanical exfoliation	Few layers	µm to cm	Large size and unmodified graphene sheets	Very small scale production
Direct sonication of graphite	Single and multiple layers	µm or sub-µm	Unmodified graphene, inexpensive	Low yield; separation
Electrochemical exfoliation/functionalization of graphene	Single and few layers	500–700 nm	Single step functionalization and exfoliation; high electrical conductivity of the functionalized graphene	Cost of ionic liquids
Super acid dissolution of graphite	Mostly single layer	300–900 nm	Unmodified graphene; scalable	Use of hazardous chlorosulfonic acid; cost of acid removal

ตารางที่ 2.2 วิธีสังเคราะห์กราฟีนจากล่างขึ้นบน

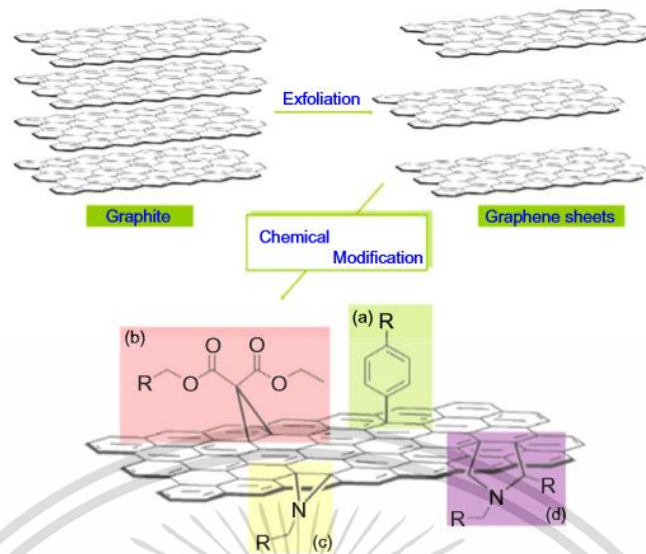
Method	Typical dimension		Advantage	Disadvantage
	Thickness	Lateral		
Confined self-assembly	Single layer	100's nm	Thickness control	Existence of defects
CVD	Few layer	Very large (cm)	Large size; high quality	Small production scale
Arc discharge	Single, bi and few layers	Few 100 nm to a few µ m	Can produce ~10 g/h of graphene	Low yield of graphene; carbonaceous impurities
Epitaxial growth on SiC	Few layers	Up to cm size	Very large area of pure graphene	Very small scale
Unzipping of carbon nanotubes	Multiple layers	few µ m long nano ribbons	Size controlled by selection of the starting nanotubes	Expensive starting material; oxidized graphene
Reduction of CO	Multiple layers	Sub-µm	Un-oxidized sheets	Contamination with α-Al ₂ O ₃ and α-Al ₂ S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide)

ในปัจจุบันกราฟีนมีราคาที่สูงมากและมีวิธีการผลิตที่ยากมาก จึงมีการพยายามอย่างมากในการค้นหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในราคาที่ย่อมเยาในการผลิตกราฟีนเพื่อที่จะนำไปใช้ ซึ่งกราฟีนออกไซด์เป็นหนึ่งในวัสดุที่ตอบโจทย์นี้ ตัวกราฟีนออกไซด์นั้นเป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนที่มีความหนาเพียงชั้นเดียวในลักษณะเดียวกันกับกราฟีนแต่จะถูกผลิตโดยวิธีออกซิเดชันกราฟไฟท์อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีราคาถูกและมีความสมบูรณ์มากกว่า ดังนั้นกราฟีนออกไซด์เป็นกราฟีนในรูปแบบออกซิไดซ์ที่เจือด้วยออกซิเจนจึงถือได้ว่ามีกระบวนการการผลิตที่ง่ายเนื่องจากสามารถใช้น้ำและตัวทำละลายอื่นๆ จนกระทั่งสามารถใช้เพื่อที่จะทำกราฟีนได้เช่นเดียวกัน กราฟีนออกไซด์ไม่มีความสามารถในการเป็นตัวนำที่ดีแต่จะมีกระบวนการที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติของตัวกราฟีนออกไซด์หรือที่เรียกกันว่ากระบวนการรีดักชัน

กราฟไฟท์ออกไซด์มีโครงสร้างที่เหมือนกันกับกราฟไฟท์แต่ระนาบของคาร์บอนอะตอมในกราฟไฟท์ออกไซด์จะประกอบไปด้วยกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนอะตอมซึ่งไม่เพียงขยายระยะห่างในแต่ละชั้นแต่ยังทำให้ความหนาของอะตอมเพิ่มขึ้น โดยชั้นออกไซด์เหล่านี้สามารถลอกได้ในน้ำภายใต้วิธีอัลตราโซนิเคชัน ถ้าแผ่นที่ลอกมานี้มีอะตอมของคาร์บอนเพียงหนึ่งชั้นหรือสองสามชั้นของคาร์บอนอะตอมเหมือนกันกับกราฟีนแผ่นเหล่านี้จะเรียกได้ว่าเป็นกราฟีนออกไซด์ ดังนั้นกราฟีนออกไซด์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยชั้นเดียวของอะตอมที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน โดยการออกซิเดชันผลึกกราฟไฟท์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งกราฟีนออกไซด์ที่ได้จะผ่านกระบวนการผลิตที่สมบูรณ์และราคาไม่สูงมากนัก ที่สำคัญที่สุดกราฟีนออกไซด์สามารถรีดิวซ์ให้เป็นแผ่นได้เหมือนกราฟีนโดยการรีดิวซ์กลุ่มที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนและทำการกู้คืนโครงสร้าง แผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์มักจะถูกเรียกว่าเป็นกราฟีนที่ได้มาจากวิธีการทางเคมีชนิดหนึ่งแล้วมักจะเรียกกันว่า rGO



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีสำหรับแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการลอกกราฟีน

กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือหนึ่งกราฟีนออกไซด์สามารถผลิตได้โดยใช้กราฟีนที่ราคาไม่แพงเป็นวัตถุดิบและใช้วิธีการทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงที่ให้ผลตอบแทนได้สูง สองคือกราฟีนออกไซด์มีความชอบน้ำที่สูงมากและสามารถสร้างเป็นสารคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพและนำไปประกอบเป็นโครงสร้างที่ทำได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาถูก แผ่นกราฟีนประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนที่มีพันธะ sp^2 แบบตรีโกณมิติเท่านั้นและราบเรียบอย่างสมบูรณ์ นอกเหนือจากะลอกคลื่นเล็กๆ แผ่นกราฟีนออกไซด์ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนที่มีพันธะ sp^3 แบบตรีโกณมิติส่วนหนึ่งซึ่งถูกแทนที่ด้วยด้านบนหรือด้านล่างระนาบของกราฟีนเล็กน้อย เนื่องจากความผิดปกติของโครงสร้างซึ่งบอกได้ว่าตาข่ายรวงผึ้งคล้ายกราฟีนในกราฟีนออกไซด์นั้นจะยังคงรูปร่างไว้แม้ว่าจะมีความไม่สมบูรณ์ของผลึก เช่น อะตอมของคาร์บอนที่ติดอยู่กับกลุ่มฟังก์ชันจะถูกแทนที่ เป็นต้น แต่ขนาดโดยรวมของเซลล์ในกราฟีนออกไซด์ยังคงเหมือนกันกับกราฟีนดังนั้น กราฟีนออกไซด์สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการกระจายแบบสุ่มของการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน ประกอบด้วยกลุ่มฟังก์ชันที่รวมกันกับส่วนที่ไม่มีการออกซิไดซ์ซึ่งคาร์บอนอะตอมส่วนมากจะยังคงรักษาความเป็น sp^2

2.3.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

คุณสมบัติเชิงกลที่ต้องการเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนแบบดั้งเดิมที่มีความหนาชั้นเดียวนั้นมี ยืนยันไว้ว่ามีค่าความแข็งแรงที่ทนต่อการแตกหักเท่ากับ 42 นิวตันต่อเมตรและมีค่า Young's modulus 1.0 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPa ในขณะที่เดียวกันมีค่าทนต่อแรงดึง 130.5 GPa และได้มีการศึกษาถึงความเหนียวของกราฟีนและมีการรายงานว่ามีค่าต่ำเพียง $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ เป็นการยืนยันว่าแผ่นกราฟีนมีค่าการแตกหักต่ำ ดังนั้นจึงเกิดการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เท่ากับกราฟีนโดยกราฟีนออกไซด์ที่มีความหนาชั้นเดียว (สังเคราะห์โดยวิธีฮัมเมล) ซึ่งมีค่า Young's Modulus เท่ากับ 207.6 GPa แม้จะมีค่าลดลงแต่ก็ยังคงมีค่าสูงอยู่ ในทำนองเดียวกัน rGO ที่มีความหนาเพียงชั้นเดียว (สังเคราะห์โดยวิธีฮัมเมลแล้วนำไปรีดักชันด้วยการอบ) แล้วได้ค่า Young's Modulus เท่ากับ 250 TPa [57]

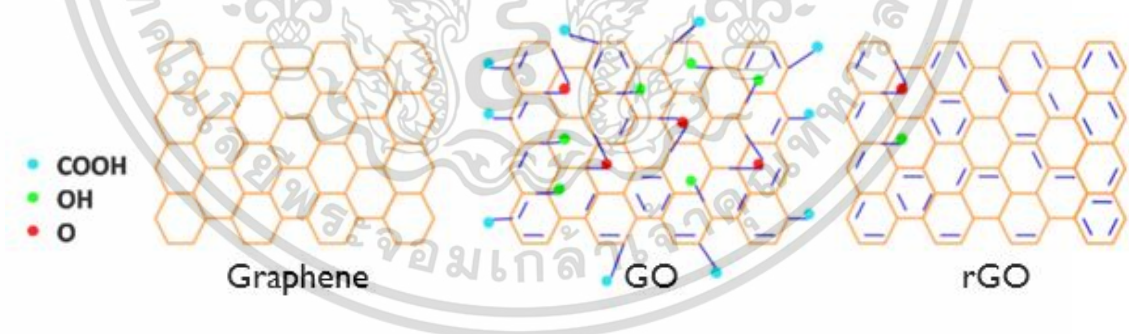
ในขณะที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีนเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมากที่มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่สูงมาก (เท่ากับ $25 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) และมีค่าความนำไฟฟ้าที่สูงเช่นเดียวกัน (เท่ากับ 6500 S/m) โดยกราฟีนนั้นประกอบขึ้น 2 มิติของคาร์บอนอะตอมหนึ่งอะตอมที่มีพันธะ sp^2 โดยกราฟีนยังถูกนำไปใช้เพื่อปรับปรุงการนำไฟฟ้าของโพลิเมอร์ ในการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์โดยทั่วไปจะเกิดกระบวนการออกซิเดชันเข้าไปขัดขวางพันธะ sp^2 ของกราฟีนซึ่งเป็นการยับยั้งการนำไฟฟ้าในกราฟีน ทำให้กราฟีนออกไซด์มีค่าความต้านทานที่สูงจึงมีศักยภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีซึ่งเป็นการทำให้เกิดการรีดักชันกราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มศักยภาพการนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ แม้หลังจากได้ rGO ก็ยังคงมีพันธะ sp^3 ที่เหลืออยู่ซึ่งออกซิเจนจะรบกวนการเคลื่อนที่ของประจุที่เหลือของ sp^2 ดังนั้นการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าส่วนใหญ่ในกราฟีนออกไซด์เกิดจากการหอบบึงซึ่งแตกต่างจากกราฟีนแบบดั้งเดิมที่ได้จากการลอกจากความจำเป็นที่ต้องทำการรีดักชันกราฟีนออกไซด์ จึงได้เกิดวิธีต่างๆเพื่อสังเคราะห์ rGO ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเทียบเท่ากับกราฟีนแบบดั้งเดิม ตัวอย่างเช่นวิธีการทางเคมีโดยการใช้ไฮดราซีนสามารถสังเคราะห์ rGO ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่ากราฟีนออกไซด์ถึง 5 ออเดอร์ และการใช้คลื่นไมโครเวฟสังเคราะห์ rGO จากกราฟีนออกไซด์เป็นเวลา 1-2 วินาทีทำให้ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในวัสดุเพิ่มขึ้นจาก $10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ กลายเป็น $0.1 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ เป็นต้น คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้นที่ได้รับจาก rGO นั้นทำให้ตัวมันเองเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นสารที่ไปเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าในวัสดุอื่นอีกหลากหลายชนิด

ในกรณีเดียวกันกับคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มานั้นมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำเช่นเดียวกันโดยมีค่าประมาณ $0.5\text{-}1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ทำให้ไม่เป็นตัวเลือกที่ดีนักในการที่จะนำไปใช้งาน ในทางกลับกันกราฟีนดั้งเดิมแสดงให้เห็นว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีมากที่มีค่าการนำความร้อนสูงถึง $3000\text{-}5000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ จึงเป็นเหตุผลให้การสังเคราะห์ rGO เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการนำความร้อนของวัสดุ

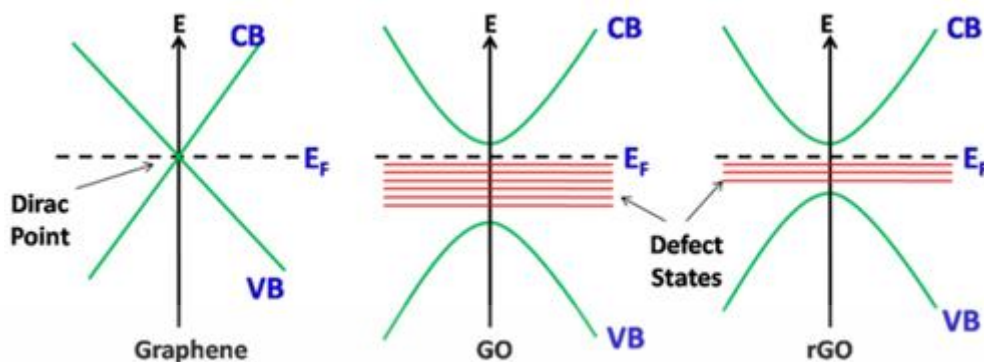
จากคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างระหว่างกราฟีนดั้งเดิมกับกราฟีน/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ดังที่กล่าวไปข้างต้นนั้นสืบเนื่องมาจากโครงสร้างของกราฟีน/รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีส่วนของกลุ่มฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์อยู่ด้วยในพันธะของคาร์บอนอะตอมดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยกราฟีนออกไซด์นั้นมีฟังก์ชันออกไซด์จำนวนมากประกอบอยู่กับพันธะของคาร์บอนอะตอมซึ่งทำให้เกิดพันธะ sp^3 ขึ้นในโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ซึ่งส่งผลต่อการขนส่งอิเล็กตรอนในกราฟีนออกไซด์ทำให้กราฟีนออกไซด์นั้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ต่ำมากหรือเสมือนว่ามีสภาพเป็นฉนวนนั่นเอง ทำให้เกิดงานวิจัยที่นำตัวกราฟีนออกไซด์นี้เองไปผ่านกระบวนการรีดักชันวิธีต่างๆ ซึ่งส่งผลให้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีจำนวนฟังก์ชันออกไซด์ในพันธะลดลงกลับเป็นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับกราฟีนดั้งเดิมแต่ก็ยังคงมีกลุ่มฟังก์ชันออกไซด์อยู่แต่ก็เป็นส่วนเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ให้เป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นและเมื่อกล่าวถึงโครงสร้างของแถบพลังงานของกราฟีน กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอย่างที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่กราฟีนนั้นไม่มีแถบพลังงานเนื่องจากจุดดิแรค (Dirac point) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในขณะที่กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีช่องว่างแถบพลังงานที่เกิดจากสิ่งปนเปื้อนจากกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนนั่นเองหรือก็คือพันธะ sp^3 ที่ส่งผลให้ช่องว่างของแถบพลังงานของกราฟีนออกไซด์มีขนาดกว้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เกิดการกำจัดกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนออกเนื่องจากกระบวนการรีดักชันทำให้ช่องว่างของพลังงานมีขนาดแคบลงเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันว่าเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากกราฟีนออกไซด์ [58]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



๖

2.3.2 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การเตรียมกราฟีนออกไซด์นั้นจะได้มาจากการออกซิไดซ์กราฟีนที่ได้ออกไซด์ที่ได้มาจากกราฟีนอีกทีหนึ่งซึ่งกราฟีนเป็นวัสดุ 3 มิติที่มาจากคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยกราฟีนเป็นล้านชั้นแต่ในขณะเดียวกันกราฟีนออกไซด์นั้นแตกต่างออกไปอันเนื่องมาจากกลุ่มออกซิเจนที่เกิดจากการออกซิไดซ์โครงสร้างผลึกกราฟีนซึ่งไม่เพียงขยายและแยกชั้นออกจากกันแล้วแต่ยังทำให้เกิดคุณสมบัติที่ขบขันอีกด้วย คุณสมบัตินี้เองทำให้สามารถทำการลอกกราฟีนออกไซด์ในน้ำได้โดยการใช้วิธีโซนิกชันเพื่อผลิตกราฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นหรือหลายชั้นที่รู้จักกันในชื่อกราฟีนออกไซด์นั่นเอง ซึ่งมีวิธีการผลิตที่หลากหลายแต่จะมีที่นิยมใช้ก็คือวิธีการฮัมเมล ซึ่งวิธีการนี้ผลึกกราฟีนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนทในกรดซัลฟิวริกและโดยทั่วไปไฮดราซีนจะใช้ในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แทน อย่างไรก็ตามตัวไฮดราซีนนี้มีความเป็นพิษที่สูงจึงเป็นเหตุให้การรีดิวซ์ทางเคมีที่ใช้ไฮดราซีนเกิดข้อจำกัด แต่ในขณะเดียวกันกราฟีนออกไซด์สามารถรีดิวซ์ไปเป็นฟิล์มบางหรือสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบได้ ตัวกราฟีนออกไซด์นี้เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการออกซิเดชันกราฟีนเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารออกซิไดซ์และผลึกกราฟีนจะทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของกราฟีนมีค่าเพิ่มขึ้น สารประกอบออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์สามารถกระจายตัวในสารละลายที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบได้จึงได้สารละลายกราฟีนออกไซด์ออกมาเป็นผลผลิต ในทางเคมีกราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ถือว่าเหมือนกันแต่กลับมีโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างสำคัญก็คือระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมของแต่ละชั้นของสารประกอบ การเพิ่มขึ้นของระยะห่างนี้เองอันเนื่องมาจากกระบวนการออกซิเดชันยังเป็นตัวขัดพันธะ sp^2 ในโครงผลึกซึ่งอธิบายได้ว่าทำไมกราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์จึงเป็นฉนวนไฟฟ้า กราฟีนออกไซด์นั้นเป็นตัวนำ

ไฟฟ้าที่แย่มากแต่สามารถปรับปรุงตัวกราฟีนออกไซด์ได้ด้วยวิธีการรีดิวซ์ด้วยวิธีต่างๆ เช่น แสง, ความเอกละเอียดนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อน, เคมี หรือไฟฟ้าซึ่งสามารถคืนค่าคุณสมบัติความนำไฟฟ้าให้กับกราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์แล้ว [59-61] สำหรับวิธีการที่สามารถเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ให้กลายเป็นกราฟีนออกไซด์นั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันส่วนมากคือการใช้สั่น (โซนิเคชัน) และการกวน (สเตอริง) หรือใช้ร่วมกันทั้ง 2 วิธี โดยการสั่นนั้นอาจเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลอกกราฟีนออกไซด์และยังประสบผลสำเร็จเป็นอย่างมากในการลอกกราฟีนออกมา อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะสร้างความเสียหายอย่างหนักต่อสะเก็ดกราฟีนและลดขนาดพื้นที่ผิวจากไมครอนไปเป็นนาโนเมตรและเกิดเป็นเกล็ดของกราฟีนหลากหลายชนิด และแน่นอนว่าข้อแตกต่างสำคัญระหว่างกราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์คือจำนวนชั้น

การรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อผลิต rGO เป็นกระบวนการที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของตัว rGO เป็นอย่างมากดังนั้นมันจะเป็นตัวกำหนดว่า rGO ใกล้เคียงมีโครงสร้างที่เป็นกราฟีนบริสุทธิ์ ถ้านำกราฟีนไปใช้ในเชิงของอุตสาหกรรมเป็นที่แน่นอนว่าจะต้องใช้กราฟีนเป็นจำนวนมากดังนั้นกราฟีนปกติที่มีราคาสูงมากไม่ตอบโจทย์การใช้งานในเชิงนี้ดังนั้น rGO จะมีบทบาทอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งมีหลายวิธีในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สามารถทำได้แม้ว่าวิธีการทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับวิธีการทางเคมี, ความร้อน, หรือไฟฟ้าเคมี เทคนิคเหล่านี้ในบางกรณีสามารถผลิต rGO ที่มีคุณภาพสูงได้มากเช่นเดียวกันกับกราฟีนในแบบดั้งเดิมแต่จะมีวิธีการที่ซับซ้อนและใช้เวลามากกว่า วิธีการที่ผ่านมาในการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ได้แก่

- ใช้ไฮดราซีนในการไฮเดรตและบำรุงรักษาสารละลายนี้ที่ 100 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- การใช้ไฮโดรเจนพลาสมาเป็นเวลาเล็กน้อย
- การกระพริบแสงที่มีพลังงานสูง
- การให้ความร้อนกราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในเวลาที่แตกต่างกัน
- การรวมกันของกราฟีนออกไซด์กับสารลดการขยายตัวเช่น ยูเรีย แล้วจากนั้นให้ความร้อนกับสารละลายเพื่อทำให้ปล่อยก๊าซที่ลดลงตามด้วยการทำให้เย็น
- ให้ความร้อนโดยตรงแก่กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ในเตาเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงมาก
- จ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยค่อยๆทำการเพิ่มแรงดันไฟให้กับกราฟีนออกไซด์

โดย rGO ที่ได้จากวิธีการทางเคมีเป็นวิธีที่ปรับขนาดได้มากแต่น่าเสียดายที่ rGO ที่ผลิตได้นั้นมีพื้นที่ผิวและการนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างแย่ ในขณะที่กราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 องศาเซลเซียสขึ้นไปแสดงให้เห็นว่า rGO ที่ได้มานั้นมีพื้นที่ผิวที่สูงมากใกล้เคียงกับกราฟีนดั้งเดิม แต่กระบวนการให้ความร้อนนี้จะทำลายโครงสร้างของกราฟีนเมื่อมีแรงดันเกิดขึ้นและจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลให้มวลของกราฟีนออกไซด์ลดลง

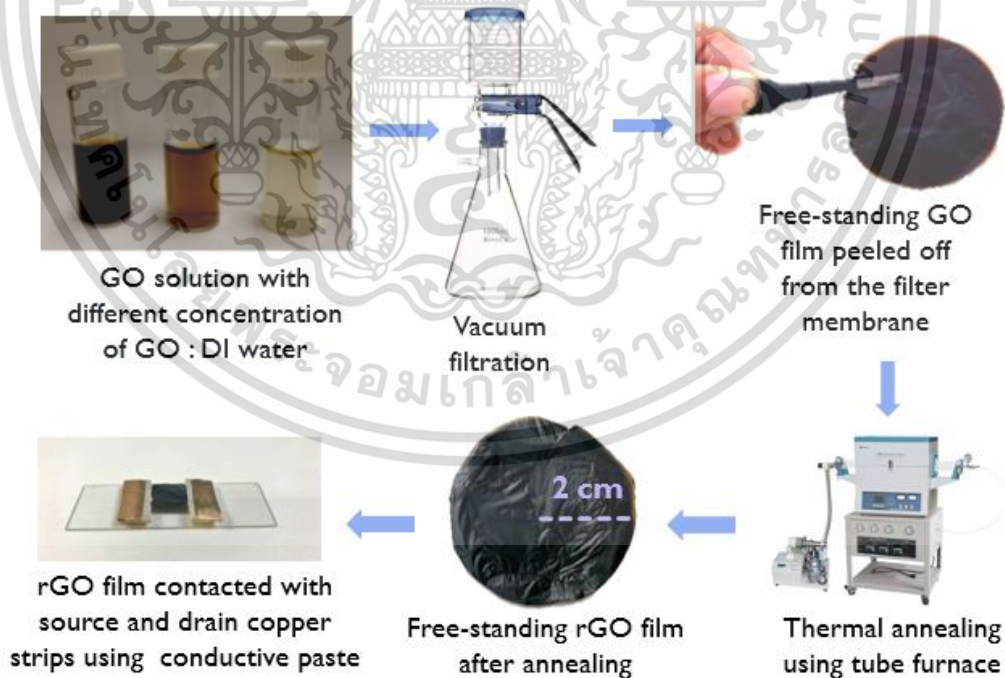
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมาก เกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกและที่ว่างเกิดขึ้นและอาจจะส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลของ rGO ที่ผลิตได้ การรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่แสดงให้เห็นว่าการผลิต rGO ที่มีคุณภาพสูงมากเกือบเหมือนกันในแง่ของโครงสร้างของ rGO และกราฟีนอีกทั้งกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบผิวต่างๆ เช่น อินเดียมทินออกไซด์หรือแก้วที่เป็นชั้นบางๆ ของกราฟีน ออกไซด์จากนั้นนำอิเล็กโทรดไปติดไว้ที่ปลายของแต่ละด้านของขั้วสเตรทเป็นวงจรมานำกราฟีน ออกไซด์ มีตัวอย่างของการทดลอง rGO แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนสูงมากและค่า ความนำไฟฟ้ามีค่าสูงมากกว่าเงินด้วยซ้ำ และวิธีการนี้ไม่มีการใช้สารเคมีอันตรายทำให้ไม่มีของเสียที่ เป็นพิษ แต่น่าเสียดายที่ความสามารถในการปรับขนาดของเทคนิคนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความยากในการ ปลูกกราฟีนออกไซด์ลงบนของอิเล็กโทรด

ข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งของกราฟีนออกไซด์คือมันง่ายต่อการละลายในน้ำและตัวทำละลาย อินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากการปรากฏตัวของฟังก์ชันออกซิเจน สิ่งนี้เองยังคงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก เมื่อทำการผสมวัสดุเข้ากับเซรามิกหรือโพลีเมอร์เพื่อพยายามปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของวัสดุเหล่านั้น อย่างไรก็ตามในแง่ของการนำไฟฟ้ากราฟีนออกไซด์มักถูกเรียกว่าเป็น ฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากการหยุดชะงักของเครือข่ายพันธะ sp^2 ในการก่อกำเนิดโครงข่ายวงผึ้งทรงหกเหลี่ยม นี้จะทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยวิธีการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยจะต้อง คำนึงว่าเมื่อกลุ่มออกซิเจนส่วนใหญ่ถูกลบออก rGO ที่ได้นั้นยากที่จะแยกออกจากกันโดยฟังก์ชันที่ เปลี่ยนไปสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์ได้ กราฟีนออกไซด์ที่ได้รับการเปลี่ยนแปลง ทางเคมีที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการใช้งานที่หลากหลาย โดยมีหลายวิธีที่กราฟีน ออกไซด์สามารถใช้งานได้โดยจะขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันที่ต้องการใช้งาน ในปัจจุบันมีความพยายาม อย่างมากที่จะผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับกราฟีนดั้งเดิมมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จึงมีการวิจัย อย่างละเอียดเพื่อกำจัดกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนออกจากกราฟีนออกไซด์ การรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นี้ สามารถทำได้โดยวิธีการหลายอย่างดังที่ได้บอกไปข้างต้นซึ่งแต่ละวิธีจะนำไปสู่ความแตกต่างของ โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การเตรียมสารละลาย กราฟีนออกไซด์ผ่านวิธีการฮัมเมอร์และทำให้เป็นแผ่นผ่านวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ จากนั้นนำแผ่น กราฟีนออกไซด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนเพื่อให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สามารถ นำไปทำอุปกรณ์ได้ดังแสดงในรูป 2.11 ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการออกแบบวิธีการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ รวมถึงอัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจนของ rGO ที่เป็นผลิตภัณฑ์ การเลือกกลุ่มออกซิเจนชนิด เดียว (ไฮดรอกซิล กรดคาร์บอกซิลิก และอีพอกซี) เป็นการลดข้อบกพร่องของผลึกที่พื้นผิวของ กราฟีนออกไซด์ที่ได้มาจากการออกซิเดชันและยังคงคำนึงถึงตัวของสารที่ใช้ในวิธีการรีดักชันที่เป็นมิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้น คว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกราฟีนออกไซด์ที่ต้องการ เช่น คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางแสง การนำไฟฟ้า และความสามารถในการละลาย เป็นต้น ในส่วนของการรีดักชันกราฟีนออกไซด์โดยกระบวนการทางความร้อนนั้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้แสดงให้เห็นว่าเสมือนช่วยลอกกราฟีนออกไซด์นาโนชีตแต่ละอันออกมา การรีดักชันด้วยวิธีการให้ความร้อนนี้ทำได้โดยการนำกราฟีนออกไซด์เข้าไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจนหรือใช้วิธีการที่นิยมใช้กันน้อยกว่าเช่นใช้คลื่นไมโครเวฟกับผงกราฟีนออกไซด์หรือใช้แสงกระพริบกับกราฟีนออกไซด์ที่เป็นฟิล์มโดยแสงนี้จะต้องมีความเข้มสูง นอกเหนือจากนี้ rGO ยังสามารถสังเคราะห์ได้ผ่านปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลซ์ (Photocatalyze) ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และมีทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังคงเป็นไปได้และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีโดยวิธีการนี้จะเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างกราฟีนออกไซด์และขั้วอิเล็กโทรดที่ได้จากวิธีการทางเคมี ดังนั้นวิธีการที่แตกต่างกันนั้นให้ข้อดีที่แตกต่างกันทั้งในด้านของการปรับขนาดต่างๆ การใช้พลังงานและปริมาณของสารเคมีที่เสียไปในขั้นตอนการผลิต จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ถูกคำนึงถึงเมื่อจะมีการรีดักชันกราฟีนออกไซด์ [62]



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการฮัมเมอร์ (Hummer’s method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กลไกการขนส่งพาหะประจุในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ปรากฏการณ์การขนส่งต่างๆ ที่พบในแถบที่มีความไม่บริสุทธิ์ มักจะเรียกกันว่า การนำความไม่บริสุทธิ์ โดยปรากฏการณ์นี้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1950 ในรูปแบบกลไกการนำความร้อนแบบใหม่ที่อุณหภูมิต่ำของซิลิกอนและเจอร์แมนเนียมที่ถูกลด โดยจากนั้นในปี 1958 พบว่าสารกึ่งตัวนำชนิด n มีความหนาแน่นของ donor ใน 3 ช่วงที่สอดคล้องกับคุณสมบัติการนำของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยในช่วงที่มีความหนาแน่นของพาหะต่ำ อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะถูกขังอยู่ในสถานะไฮโดรเจน 1s รอบๆ สารเจือที่ปนด้วย donor แต่ละตัว ซึ่งการนำจะเกิดขึ้นในอุณหภูมิเฉพาะในตัวอย่างที่เกิดการชดเชยนอกเหนือจากจำนวนของ donor จะน้อยกว่าจำนวนของ acceptor โดยในตัวอย่างที่ว่านี้ระดับชั้นของผู้ให้จะว่างเปล่าและอยู่ร่วมกับระดับชั้นที่ถูกครอบครองโดยผู้รับ เนื่องจากการที่ผู้รับมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นนอกจากนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่สถานะถูกครอบครองจะสามารถกระโดดไปหาที่ว่างได้ก่อให้เกิดเป็นการนำไฟฟ้าตามสมการ [64]

$$\sigma = \sigma_3 \exp(-\varepsilon_3/k_B T) \quad (5)$$

เมื่อความเข้มข้นของสารเจือเพิ่มขึ้นจะมีฉนวนอื่นปรากฏขึ้นซึ่งส่วนที่เกิดฉนวนขึ้นนั้นจะเรียกว่า ช่วงที่มีความเข้มข้นเกิดขึ้นทันทีโดยในช่วงนี้ค่าการนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นตามสมการ

$$\sigma = \sigma_2 \exp(-\varepsilon_2/k_B T) \quad (6)$$

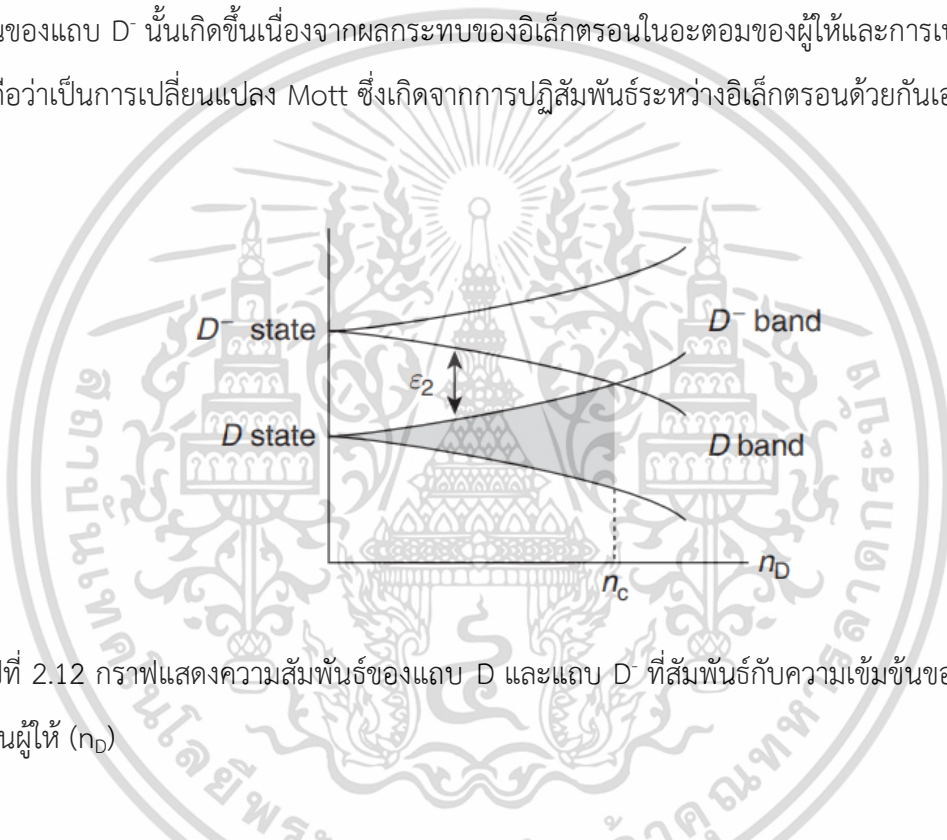
พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น ε_2 จะลดลงเมื่อ ความเข้มข้นของผู้ให้เพิ่มขึ้นและสุดท้ายพลังงานนี้จะหมดหายไปจุดความเข้มข้นของสารเจือวิกฤติ n_c เหนือจุดนี้ขึ้นไปการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นรูปแบบของโลหะ จซึ่งจะสรุปได้ว่าค่าการนำไฟฟ้าทั้งหมดจะมีค่าเป็นดังสมการ

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left(-\frac{\varepsilon_1}{k_B T}\right) + \sigma_2 \exp\left(-\frac{\varepsilon_2}{k_B T}\right) + \sigma_3 \exp\left(-\frac{\varepsilon_3}{k_B T}\right) \quad (7)$$

โดยในที่นี้ ε_1 คือพลังงานที่ต้องการในการฉีดอิเล็กตรอนไปยังแถบนำ จุดเริ่มต้นของความเข้มข้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น ε_2 ซึ่งถูกกำหนดไว้ว่าเป็นพลังงานที่จำเป็นในการกำจัดอิเล็กตรอนออกจากผู้ให้หนึ่งตัวและโอนพลังงานนี้ไปยังผู้ให้ตัวอื่นที่มีอิเล็กตรอนอยู่แล้ว ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับสุดท้ายจะเรียกระดับนั้นว่า D^- ไอออนโดยที่ไอออนของผู้ให้จะมีค่าเป็นลบ รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของผู้ให้ทั้งในส่วนของผู้ให้ที่ระดับชั้นพื้นและระดับ D^- ซึ่งขยายวงกว้างขึ้นเพื่อทำการสร้างแถบพลังงานซึ่งจะเรียกว่า แถบ D และแถบ D^- ในกรณีที่แถบ D ถูกอิเล็กตรอนเติมจนเต็มและที่การนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเฉพาะการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบ D ไปยังแถบ D^- เท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้น ϵ_2 จะสอดคล้องกับพลังงานของช่องว่างระหว่างแถบสองแถบซึ่งจากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าพลังงานช่องว่างนี้ ϵ_2 จะลดลงเมื่อจำนวนพาหะของผู้ให้ n_D เพิ่มขึ้นและจะหายไปเมื่อถึงจุด n_c ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากตัวนำไปเป็นฉนวน (MI Transitions) ดังนั้นการปรากฏขึ้นของแถบ D^- นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของอิเล็กตรอนในอะตอมของผู้ให้และการเปลี่ยนแปลงนี้ถือว่าการเปลี่ยนแปลง Mott ซึ่งเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนด้วยตัวเอง



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแถบ D และแถบ D^- ที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารเจือที่ เป็นผู้ให้ (n_D)

กลไกการเคลื่อนที่แบบบอลลิสติก (Ballistic Transport) คือการไหลหรือการเคลื่อนที่ของพาหะประจุซึ่งโดยทั่วไปจะกล่าวถึงอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นระยะทางที่ยาวมากในวัสดุใดๆ ด้วยความเร็วสูง ซึ่งโดยปกติในสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุนั้นจะมีสาเหตุมาจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในตัวกลางที่เกิดจากการกระจายตัวจากความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของผลึกหรือเกิดจากความผันผวนทางความร้อนของไอออนในผลึกที่เป็นของแข็ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกลไกการเคลื่อนที่แบบบอลลิสติกจะสามารถพบได้ในวัสดุที่มีโครงสร้างแบบกึ่งหนึ่งมิติ (Quasi-1D) เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) โดยที่กลไกการเคลื่อนที่แบบบอลลิสติกนี้ไม่เพียงสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้เท่านั้น ยังรวมไปถึงการอธิบายถึงโฟนอนอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

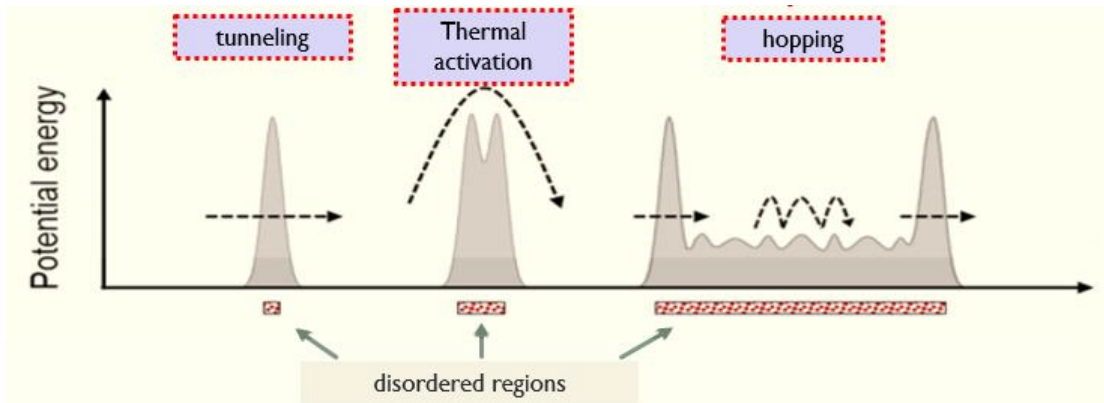
ในขณะที่เมื่อกล่าวถึงกลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของวัสดุนั้นที่ระดับพลังงานเฉพาะ (Localized State) นั้นจะเกิดกระบวนการย้ายระดับพลังงานแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ของพาหะประจุที่จะทำการกระโจน (Hopping) ไปยังระหว่างระดับพลังงานเฉพาะอีกจุดหนึ่งโดยเมื่อมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องการกระโจนที่ว่่านี้จะเรียกว่าเป็นการกระโจนที่มีโฟนอนเข้ามาช่วยในการกระโจนซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Variable Range Hopping Model ซึ่งโดยทั่วไปโมเดลนี้จะใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบหรือของแข็งอสัณฐานโดยการกระโจนของพาหะประจุในวัสดุอันเนื่องมาจากการที่ช่วงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นดังสมการที่ 8

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(T_0/T)^{1/(d+1)}} \quad (8)$$

เมื่อ d คือทิศของการกระโจนของพาหะประจุ (ระบุนิพจน์ของโมเดลที่ขึ้นอยู่กับมิติ) เมื่อ $d = 1, 2$ และ 3 คือ 1D, 2D และ 3D Mott Variable Range Hopping ตามลำดับโดยที่ Mott Variable Range Hopping นี้เองนั้นเป็นโมเดลที่ใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุที่อุณหภูมิต่ำๆ เนื่องจากเป็นย่านที่วัสดุมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบเป็นแถวยาวดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุจะเปลี่ยนไปสืบเนื่องมาจากการที่บางช่วงนั้นวัสดุมีช่วงในการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบที่สั้นลงโดยช่วงการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบที่สั้นลงนี้เองทำให้กลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนั้นเปลี่ยนไปซึ่งอธิบายได้ด้วยหลักของการลอดอุโมงค์ควอนตัม (Quantum Tunneling) และการเคลื่อนที่จากการกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Activation Transport) ด้วยกันกับโมเดล 3D-Mott Variable Range Hopping ซึ่งแสดงให้เห็นดังสมการที่ 9 [65]

$$G(T) = G_t + G_a \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) + G_h \exp\left(-\frac{H}{T^{1/4}}\right) \quad (9)$$

เมื่อ G_h , G_a และ G_t เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบองถึงส่วนประกอบของโมเดล 3D-Mott Variable Range Hopping, กลไกการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อนและการลอดอุโมงค์ควอนตัมตามลำดับ [65]



รูปที่ 2.13 อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบของวัสดุกับกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุ

2.4.1 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ Schottky (Schottky mechanism model)

ในวัสดุที่เป็นของแข็งนั้นในหนึ่งอะตอมจะมีอิเล็กตรอนสองตัวหรือน้อยกว่านั้นบรรจุอยู่ซึ่งอิเล็กตรอนนี้จะมีอิสระในการเคลื่อนย้ายจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่งตามทฤษฎีแถบพลังงานและการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนออกจากพื้นผิวของวัสดุนั้นจำเป็นต้องการพลังงานขั้นต่ำเพื่อปล่อยอิเล็กตรอนออกจากพื้นผิวของวัสดุซึ่งเรียกการทำงานนี้ว่าฟังก์ชันงาน (Work function) โดยมีที่มาจากพลังงานความร้อน (พลังงานขั้นต่ำที่จำเป็น) ที่ใช้ในการปลดปล่อยพาหะประจุออกจากพื้นผิวของวัสดุโดยพลังงานความร้อนนี้มีที่มาจากสนามไฟฟ้าที่เป็นตัวช่วยให้เกิดฟังก์ชันงานให้พาหะประจุถูกปลดปล่อยออกมาและการเคลื่อนที่ของพาหะประจุจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าออกมาโดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมานี้จะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับฟังก์ชันงานและกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโลหะตามสมการ [64,66]

$$J = A_G T^2 e^{-\frac{W}{kT}} \quad (10)$$

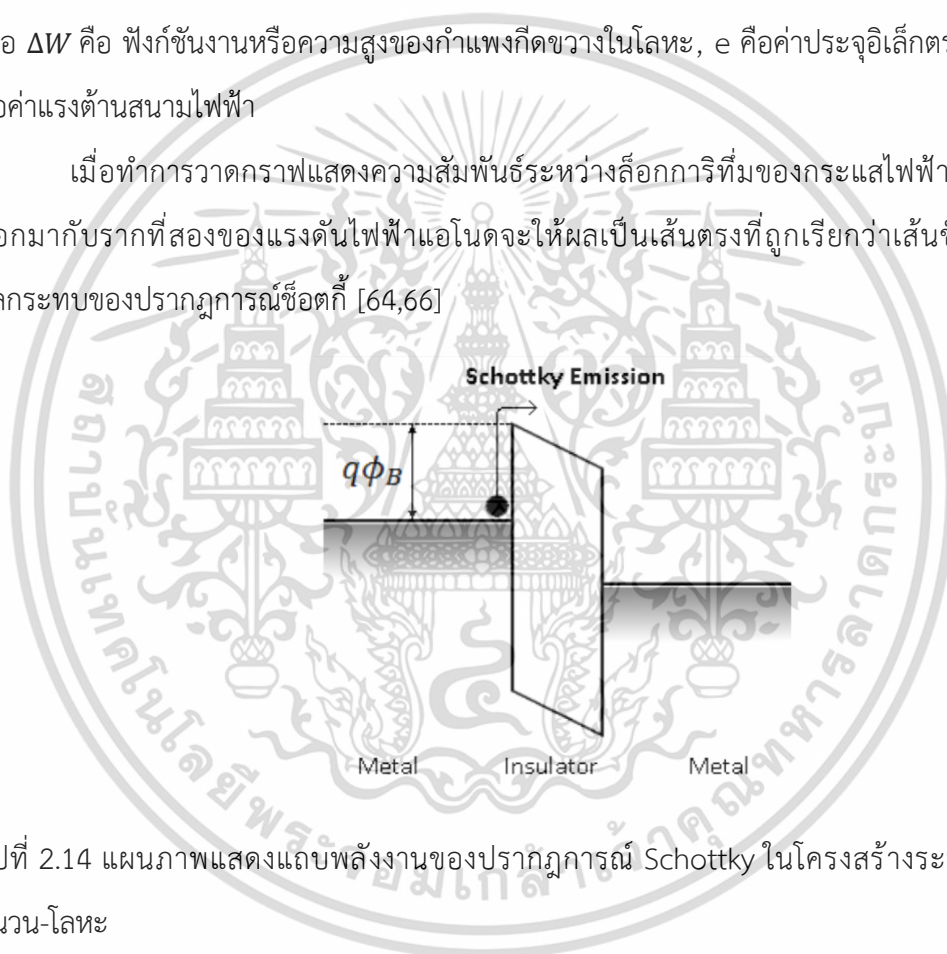
เมื่อ J คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ถูกปล่อยออกมา, T คืออุณหภูมิของโลหะ, W คือฟังก์ชันการทำงานของโลหะ, k คือค่าคงที่ของ Boltzmann, และ A_G คือผลคูณระหว่างค่าคงที่สากล A_0 คูณด้วยค่าจำเพาะของวัสดุซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ที่ 0.5

ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าจะมีกำแพงกีดขวางจากอิเล็กตรอนในแถบพลังงานเฟอร์มิ (Fermi-energy) ที่มีความสูงเท่ากับฟังก์ชันงาน W ดังนั้นเมื่อมีมีค่าสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะลดลงความสูงของกำแพงกีดขวางในที่สุดทำให้เพิ่มค่าของกระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมาตามสมการความสัมพันธ์ [64,66]

$$\Delta W = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \quad (11)$$

เมื่อ ΔW คือ ฟังก์ชันงานหรือความสูงของกำแพงกีดขวางในโลหะ, e คือค่าประจุอิเล็กตรอนและ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้า

เมื่อทำการวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมากับรากที่สองของแรงดันไฟฟ้าแอนโนดจะให้ผลเป็นเส้นตรงที่ถูกเรียกว่าเส้นช็อตกีที่เป็นผลกระทบของปรากฏการณ์ช็อตกี [64,66]



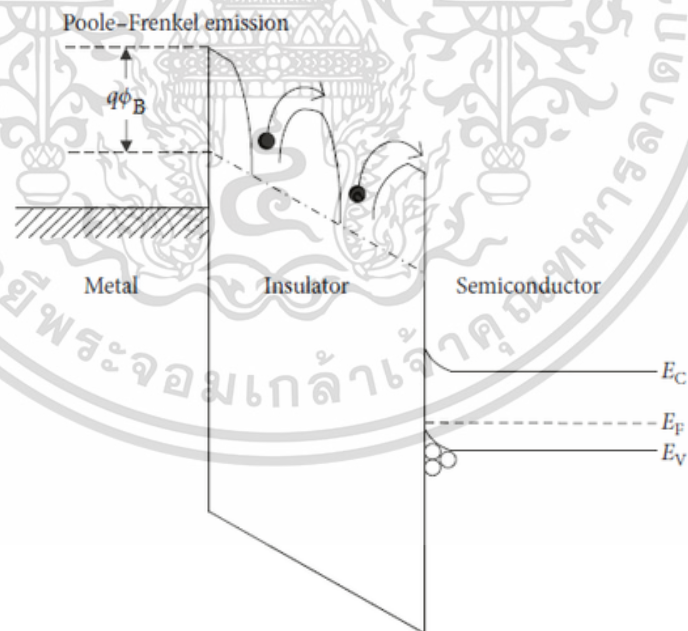
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของปรากฏการณ์ Schottky ในโครงสร้างระหว่างโลหะ-ฉนวน-โลหะ

2.4.2 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ Poole-Frenkel (Poole-Frenkel mechanism model)

ในซิลิคอสเตทฟิสิกส์ผลกระทบของปรากฏการณ์ Poole-Frenkel เป็นแบบจำลองที่อธิบายกลไกการขนส่งพาหะประจุเข้ามาช่วยในฉนวนไฟฟ้าซึ่งได้รับการตั้งชื่อตาม Yakov Frenkel จากบทความที่ตีพิมพ์ในปี 1938 [67] ซึ่งมีหลักการทำงานว่าอิเล็กตรอนนั้นสามารถเคลื่อนที่อย่างช้าๆ

ผ่านฉนวนไฟฟ้าได้ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนจะถูกขังอยู่กับดักประจุในสถานะพื้น (Localization เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

state) หรือเรียกได้ว่าติดอยู่กับอะตอมเดี่ยวและไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรอบๆ ผลึกได้แต่ในบางครั้ง ความผันผวนของความร้อนแบบสุ่มและไม่สามารถคาดการณ์ได้จะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถออกจากสถานะพื้นนี้ได้และเคลื่อนที่ไปยังแถบนำ (Conduction band) และเมื่ออิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านผลึกได้ชั่วคราวหนึ่งก่อนที่จะคลายตัวเข้าสู่สถานะพื้นในจุดอื่นหรือก็คือไปติดอยู่กับอีกอะตอมหนึ่งแทน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วผลกระทบของปรากฏการณ์ Poole-Frenkel สามารถเปรียบเทียบได้กับผลกระทบจากปรากฏการณ์ Schottky ซึ่งเป็นการลดลงของกำแพงที่กีดขวางพลังงานในฉนวนของโลหะอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับสนามไฟฟ้าที่เป็นส่วนต่อประสานระหว่างโลหะและฉนวนไฟฟ้าแต่อย่างไรก็ตามการนำไฟฟ้าที่เกิดจากแบบจำลองนี้จะตรวจพบเมื่อเกิดการนำไฟฟ้าแบบจำกัด (Bulk-limited conduction) เมื่อกระบวนการการนำไฟฟ้าถูกจำกัดภายใต้วัสดุ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยเนื่องจากผลกระทบของปรากฏการณ์ Schottky จะถูกสังเกตก็ต่อเมื่อมีการนำไฟฟ้าที่ถูกจำกัดบริเวณขั้วสัมผัส (Contact-limited) เมื่อกลไกการจำกัดการนำไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างโลหะและฉนวนไฟฟ้า [64,68]



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงแถบพลังงานของผลกระทบปรากฏการณ์ Poole-Frenkel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบการชุดอุโมงค์ FN (F-N Tunneling mechanism model)

ปรากฏการณ์การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field electron emission) เป็นการปล่อยอิเล็กตรอนที่มีที่มาจากไฟฟ้าสถิตย์ที่พบบ่อยที่สุดจากการปล่อยอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของของแข็งไปสู่สุญญากาศ แต่อย่างไรก็ตามการปล่อยอิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากพื้นผิวที่เป็นทั้งของแข็งหรือของเหลวในสุญญากาศหรือในของไหล (เช่น อากาศ) หรือฉนวนไฟฟ้าหรือแม้กระทั่งไดอิเล็กตริกที่เป็นตัวนำไฟฟ้าแบบอ่อนๆ โดยสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำจะทำการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปยังแถบนำ (Conduction band) ของสารกึ่งตัวนำ (ปรากฏการณ์ซีเนอร์) ซึ่งยังถือว่าเป็นการแผ่รังสีของสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์โฟโตเอฟเฟค (Photo-effect) บนพื้นผิว การแผ่รังสีความร้อน (หรือเรียกว่าปรากฏการณ์ Richardson-Dushman) และการปล่อยอิเล็กตรอนแบบเย็น ทั้งหมดนี้กล่าวถึงเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าสถิตย์ความเข้มสูง

การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าในโลหะบริสุทธิ์ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าความเข้มสูงซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณฟังก์ชันการทำงานอย่างมาก แม้ว่าแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่อิงจากการปล่อยอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายซึ่งปรากฏการณ์นี้เองมักเป็นสาเหตุหลักที่ไม่พึงประสงค์ของการพังทลายของตัวอย่างในสุญญากาศและปรากฏการณ์แผ่รังสีของประจุไฟฟ้าที่เป็นปรากฏการณ์ที่จำเป็นต้องป้องกันอุปกรณ์จากผลกระทบของปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยตัวอย่างการใช้งานสำหรับการปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าบนพื้นผิว ได้แก่การสร้างแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเพื่อให้ความสว่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ต้องการความละเอียดสูงหรืออุปกรณ์ที่กำจัดประจุเหนี่ยวนำที่เรียกว่าเครื่องทำให้เป็นกลางด้วยประจุไฟฟ้า เป็นต้น

การปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากของสนามไฟฟ้านี้เองอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์อุโมงค์ควอนตัมของอิเล็กตรอนที่ค้นพบในช่วงปลายทศวรรษที่ 1920 สำหรับทฤษฎีการปล่อยสนามไฟฟ้าของโลหะโดย Ralph H.Fowler และ Lothar Wolfgang Nordheim [69] เกิดเป็นสมการและแบบจำลองตามชื่อของผู้คนพบที่นำมาใช้งานเฉพาะการแผ่รังสีของสนามไฟฟ้าในโลหะและผลึกของแข็ง แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ Fowler-Nordheim Tunneling คืออุโมงค์ควอนตัมของคลื่นกลของอิเล็กตรอนผ่านสิ่งกีดขวางที่ถูกสร้างขึ้นที่พื้นผิวของอิเล็กตรอนที่เป็นตัวนำโดยการใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงมากทำให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะผ่านสิ่งกีดขวางนี้ได้โดยผ่านผ่าน

อุโมงค์ FN
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปล่อยอิเล็กตรอนแบบเย็นในสนามไฟฟ้านั้นเป็นชื่อที่กำหนดให้กับแบบจำลองกลไกการขนส่งที่อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์และอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาส่วนใหญ่นั้นหลบหนีผ่านอุโมงค์ตามแบบจำลอง FN จากสถานะอิเล็กตรอนที่ใกล้กับกับระดับเฟอร์มิ (ในทางตรงข้ามในย่านของปรากฏการณ์ Schottky อิเล็กตรอนส่วนใหญ่หนีข้ามสิ่งกีดขวางไปเมื่อความสูงของสิ่งกีดขวางลดต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่อยู่เหนือระดับเฟอร์มิขึ้นไป) ซึ่งมีวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลวจำนวนมากสามารถปล่อยอิเล็กตรอนด้วยปรากฏการณ์นี้ถ้าจ่ายสนามไฟฟ้าในขนาดที่เหมาะสม รูปแบบของสมการจากแบบจำลอง Fowler-Nordheim ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสนามและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นสมการที่ประมาณการณ์ทางทฤษฎีที่ได้มาจากการอธิบายความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเฉพาะ J ที่ปล่อยออกมาจากสถานะของอิเล็กตรอนภายในแถบนำไฟฟ้าของโลหะ ความหนาแน่นของกระแสที่ถูกปล่อยออกมาสำหรับบริเวณที่มีพื้นผิวสม่ำเสมอขนาดเล็γκมักจะแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำงานในพื้นที่และสนามกันภายใน F ที่กำหนดลักษณะเฉพาะของพื้นที่ขนาดเล็กในขณะที่พื้นที่โค้งมนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอาจขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายความโค้งของพื้นผิวด้วย [64,70]

2.4.4 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ SCLC (Space charge limited current mechanism model)

ปรากฏการณ์ประจุค้าง (Space charge) คือการตีความการสะสมประจุไฟฟ้าโดยที่ประจุไฟฟ้าส่วนเกินนั้นจะถูกนับว่าเป็นประจุต่อเนื่องที่กระจายไปทั่วบริเวณพื้นที่แทนที่จะเป็นประจุแบบจุดที่ชัดเจน โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองนี้จะใช้เมื่อมีการปล่อยพาหะประจุบางส่วนออกมาจากพื้นที่บางส่วนของของแข็งซึ่งกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาสามารถสร้างพื้นที่ประจุค้างได้หากมีการแพร่กระจายเพียงพอหรืออะตอมหรือโมเลกุลที่มีประจุถูกทิ้งไว้ข้างหลังในของแข็งสามารถก่อตัวเป็นช่วงประจุค้างได้ ปรากฏการณ์ประจุค้างนี้สามารถเกิดขึ้นได้เฉพาะในอุปกรณ์สื่อนำไอเล็กทริก (รวมถึงสุญญากาศ) เพราะในตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้านั้นประจุมักจะถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าโดยที่เครื่องหมายของประจุค้างนั้นสามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบซึ่งสถานการณ์ที่เกิดขึ้นสำหรับปรากฏการณ์ประจุค้างที่น่าจะคุ้นเคยที่สุดก็คือ การทำให้วัตถุที่เป็นโลหะถูกความร้อนจนเป็นไฟ (เปล่งแสงออกมาเนื่องจากความร้อน) ในสุญญากาศซึ่งผู้สังเกตเห็นคนแรกคือ โทมัส เอดิสัน ที่สังเกตเห็นครั้งแรกในเส้นใยหลอดไฟซึ่งบางครั้งเรียกว่าหลอดไฟเอดิสัน โดยปรากฏการณ์ประจุค้างเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และโซลิตสเตรทจำนวนมาก

เมื่อวัตถุที่เป็นโลหะถูกวางไว้ในสุญญากาศและถูกทำให้ร้อนจนเป็นไฟ (เปล่งแสงออกมาเนื่องจากความร้อน) จะทำให้มีพลังงานมากเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนออกจากพื้นผิวของอะตอมและล้อยรอบวัตถุที่เป็นโลหะในรูปของกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนอิสระ สิ่งนี้เรียกว่า การปล่อยความร้อน โดยกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนที่ได้นี้จะมีประจุเป็นลบและสามารถดึงดูดไปยังวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกที่อยู่ใกล้ๆได้ ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในสุญญากาศ

ปรากฏการณ์ประจุค้างอาจเกิดได้จากปรากฏการณ์ต่างๆ แต่มีที่สำคัญที่สุดอยู่ 3 อย่างก็คือ การรวมตัวกันของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานที่เป็นเนื้อเดียวกัน, การแตกตัวเป็นไอออนภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อสร้างประจุเฮเทอโร (Hetero charge) และการฉีดพาหะประจุจากอิเล็กโทรดและการเพิ่มความเข้มโพลาริไซในโครงสร้างต่างๆ และมีการแนะนำว่ากระแสไฟฟ้าสลับจะทำให้พาหะประจุที่ฉีดเข้าไปในช่วงครึ่งรอบ (Half cycle) จะถูกขับออกในช่วงครึ่งรอบถัดไปซึ่งหมายความว่าความวายอัตรรวมสุทธิของประจุไฟฟ้าในหนึ่งรอบแทบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามส่วนเล็กๆของพาหะประจุจะสามารถติดกับดักประจุอยู่ในระดับที่ลึกพอที่จะรักษาตัวเองไว้ได้แม้ในสภาวะที่สนามไฟฟ้าถูกพลิกกลับ (กระแสสลับ) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วปริมาณประจุไฟฟ้าในกระแสสลับควรที่จะเพิ่มขึ้นซ้ำว่าไฟฟ้ากระแสตรงและยังสามารถสังเกตได้ชัดยิ่งขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น อีกหนึ่งสิ่งที่ต้องอธิบายก็คือประจุโฮมและเฮเทอโรโดยที่ประจุเฮเทอโรหมายความว่าประจุค้างนั้นมีขั้วอยู่ตรงข้ามกันกับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงและประจุโฮมก็คือสถานการณ์ตรงกันข้ามนั่นเอง และภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงประจุแบบเฮเทอโรที่อยู่ใกล้กับอิเล็กโทรดจะลดแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการพังทลายลงในขณะที่ประจุโฮมจะทำให้เพิ่มขึ้นและหลังจากการกลับขั้วไฟฟ้าภายใต้ไฟฟ้ากระแสสลับประจุโฮมจะถูกแปลงเป็นประจุค้างแบบเฮเทอโร

ในกรณีที่สุญญากาศมีความดัน 10^{-6} มิลลิเมตรปรอทหรือน้อยกว่านั้น พาหะหลักในการนำไฟฟ้าจะเป็นอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของการปล่อยกระแสไฟฟ้า (J) จากแคโทดตามหลักของอุณหพลศาสตร์ อุณหภูมิจ (T) ในกรณีที่ไม่มีประจุค้างจะถูกกำหนดโดยกฎของริชาร์ดสัน (Richardson's Law) [64,71]

$$J = (1 - \bar{r})A_0T^2 \exp\left(\frac{-\phi}{kT}\right) \quad (12)$$

เมื่อ A_0 มีค่าประมาณ 1.2×10^6 A/m²K², e คือค่าประจุไฟฟ้าบวก, m_e คือมวลของอิเล็กตรอน, k คือค่าคงที่ของโบลท์มันน์, h คือค่าคงที่ของพลังค์ ϕ คือค่าฟังก์ชันการทำงานของแคโทดและ \bar{r}

คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ย โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอาจต่ำถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.105 แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าใกล้เคียง 0.5 [64,71] โดยจากสมการนั้นกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาตามนั้นมากกว่าที่อิเล็กโทรดเก็บไว้ตามปกติคล้ายเท้ายกเว้นกรณีของพัลส์วาล์ว (Pulse valve) เช่น แมกนีตรอนแบบโพรง ซึ่งอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกล็อกกลับโดยแรงผลักรวมของกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณใกล้เคียง สิ่งนี้เรียกว่าผลกระทบของประจุค้างและในขีดจำกัดของความหนาแน่นของกระแสขนาดใหญ่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสมการของไฮลด์และลามัวร์จะเป็นสมการที่ใช้แทนที่สมการที่กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งกฎของไฮลด์ระบุว่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกจำกัดสำหรับปรากฏการณ์ประจุค้างในไดโอดสุญญากาศแบบระนาบขนานจะแปรผันโดยตรงกับหนึ่งส่วนสามของกำลังไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าขั้วแอโนดและผกผันเป็นกำลังสองของระยะทาง (d) ที่แยกระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด สำหรับอิเล็กตรอนความหนาแน่นของกระแส (J) สามารถเขียนได้เป็น [64,72]

$$J = \frac{I}{S} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (13)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าของขั้วแอโนด, S คือพื้นที่พื้นผิวของขั้วแอโนดที่ได้รับกระแสไฟฟ้า, e คือขนาดของประจุอิเล็กตรอนและ m_e คือมวลของอิเล็กตรอน สมการนี้เรียกอีกอย่างว่ากฎกำลังสามส่วนหรือกฎไฮลด์-แลงเมียร์ เดิมเริ่มต้นโดยไฮลด์สำหรับกรณีของอะตอมไอออนซึ่งมีอัตราส่วนประจุต่อมวลน้อยกว่ามาก และต่อมาเออร์วิน แลงเมียร์ได้นำมาประยุกต์ใช้กับกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนและขยายไปถึงกรณีของแคโทดทรงกระบอกและแอโนดโดยที่ความถูกต้องของสมการนั้นขึ้นอยู่กับสมมติฐานต่อไปนี้คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบบอลลิสติกกระหว่างอิเล็กโทรด (ไม่มีการกระเจิง), ในพื้นที่ระหว่างอิเล็กโทรดประจุค้างของไอออนใดๆจะถือว่ามีผลเพียงเล็กน้อย (ไม่ถูกนำมาคิด) และอิเล็กตรอนมีความเร็วเป็นศูนย์ที่พื้นผิวของขั้วแคโทดแต่ข้อสันนิษฐานที่ว่าไม่เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนเป็นสิ่งที่ทำให้สมการนี้แตกต่างจากกฎของม็อตต์และเกอร์นีย์ (Mott-Gerney) ซึ่งอย่างหลังถือว่าเป็นกลไกการขนส่งแบบดริฟท์ในสภาวะคงตัวซึ่งมีการกระเจิงเกิดขึ้นอย่างรุนแรง [73,74]

ในสารกึ่งตัวนำและวัสดุที่เป็นฉนวน สนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคที่มีประจุหรืออิเล็กตรอนสามารถไปถึงความเร็วดริฟท์จำเพาะที่มีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าซึ่งมีความแตกต่างจากพฤติกรรมของพาหะประจุอิสระในสุญญากาศซึ่งสนามจะเร่งให้อนุภาคมีความเร็วเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนระหว่างขนาดของความเร็วดริฟท์ (v) และสนามไฟฟ้า (ϵ) จะถูกเรียกว่าความคล่องตัว (Mobility: μ) จากกฎของไฮลด์สำหรับกระแสไฟฟ้าที่จำกัดในประจุค้างซึ่งใช้กับไดโอดสุญญากาศโดยทั่วไปนั้นจะไม่มีผล

กับสารกึ่งตัวนำหรือวัสดุที่เป็นฉนวนในอุปกรณ์แบบพาหะเดี่ยว (Single-carrier devices) และจะถูกแทนที่ด้วยกฎของมอตต์และเกอร์นีย์สำหรับวัสดุที่มีความหนา (L) ประกอบอยู่กับหน้าสัมผัสแบบโอห์มิกที่มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) ที่ไหลผ่านแผ่นนั้นกำหนดตามสมการ [64,75-76]

$$J = \frac{9}{8} \epsilon \mu \frac{V^2}{L^3} \quad (14)$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าที่กระจายไปทั่วแผ่นบางและ ϵ คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าของของแข็ง

กฎของมอตต์และเกอร์นีย์นั้นได้นำเสนอข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญบางประการที่เกี่ยวกับกลไกการขนส่งของพาหะประจุภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งกล่าวได้ว่า ไม่ควรคาดการณ์ว่ากระแสทรานซิสต์จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่นกฎของโอห์มที่คาดหวังว่ากลไกการขนส่งพาหะประจุข้ามวัสดุที่เป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจืออยู่สูง ซึ่งในกฎของมอตต์และเกอร์นีย์นั้นไม่ทราบค่าสภาพคล่องตัวของประจุไฟฟ้า (μ) สมการนี้จึงมักใช้เพื่อกำหนดลักษณะของกลไกการขนส่งพาหะประจุในสารกึ่งตัวนำ แต่อย่างไรก็ตามการใช้กฎของมอตต์และเกอร์นีย์ในการจำแนกลักษณะของสารกึ่งตัวนำอสังฐานร่วมกับสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องผลึกหรือประกบกับหน้าสัมผัสที่ไม่ใช่แบบโอห์มิกควรนำมาใช้งานด้วยความระมัดระวังเนื่องจากจะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างมีนัยยะสำคัญขึ้นทั้งในด้านของขนาดของกระแสไฟฟ้าและการพุงพากฎของกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถสังเกตได้ในกรณีเหล่านี้ดังนั้นกฎของมอตต์และเกอร์นีย์นั้นไม่สามารถนำมาใช้กำหนดลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำได้อย่างทันท่วงทีและควรใช้สมการอื่นๆ ที่สามารถอธิบายได้แทนที่โดยควรตั้งสมมติฐานต่อไปนี้จะนำมาใช้ คือ มีตัวพาประจุเพียงชนิดเดียวเท่านั้นระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล วัสดุที่นำมาใช้ไม่มีค่าการนำไฟฟ้าที่แท้จริงแต่พาหะประจุจะถูกฉีดเข้าไปจากอิเล็กโทรดด้านหนึ่งและถูกจับเอาไว้ที่อีกขั้วหนึ่งแทน, ค่าสภาพคล่องตัวทางไฟฟ้าและค่าแรงต้านไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ตลอดทั้งตัวอย่าง, กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไม่ได้ถูกจำกัดด้วยกับดักประจุหรือความผิดปกติต่างๆในโครงสร้างและสนามไฟฟ้าที่ขั้วของอิเล็กโทรดที่ถูกฉีดพาหะประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายความว่ากระแสจะถูกควบคุมด้วยการตรึงเท่านั้น

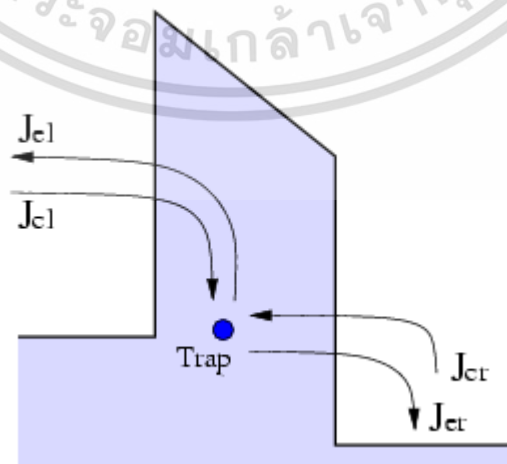
2.4.5 แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ TAT (Trap-assisted tunneling mechanism model)

นอกจากการอุโมงค์ที่เกิดขึ้นโดยตรงหรืออุโมงค์จากปรากฏการณ์ FN (Fowler-Nordheim) ซึ่งเป็นกระบวนการของอุโมงค์ที่เกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียวแล้ว ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชั้นของไดอิเล็กทริกยังก่อให้เกิดกระบวนการสร้างอุโมงค์โดยพิจารณาจากสองขั้นตอนขึ้นไปซึ่งสันนิษฐานว่ากับดักประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นในชั้นอิเล็กทริกเนื่องจากความเค้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงเข้าไปซึ่งกระแสที่ได้จากอุโมงค์ที่เพิ่มขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำเรียกว่ากระแสรั่วที่เกิดจากความเครียด (SILC) และมีหน้าที่หลักสำหรับการเสื่อมสภาพของเวลาในการเก็บรักษาข้อมูลในอุปกรณ์จำพวกอุปกรณ์หน่วยความจำเป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเกิดจากการเปลี่ยนผ่านของอุโมงค์ที่ช่วยในการดักจับประจุแบบไม่ยืดหยุ่นและกับดักพาหะประจุนี้ถูกสร้างขึ้นจากความเครียดจากสนามแรงดันไฟฟ้าสูงที่จ่ายเข้าไปเข้ามา

แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบ TAT ที่ไม่ยืดหยุ่นและยังคำนึงถึงการนำไฟฟ้าแบบกระโดดอีกด้วยซึ่งได้มาจากการที่กระแสไฟฟ้าช่วยดักจับโดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและพลังงานของไดอิเล็กทริกที่เขียนได้ว่า [64]

$$J_{TAT} = \int_0^{t_{diel}} dx \int_{\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} \bar{J}(\epsilon_T, x) d\epsilon \quad (15)$$

เมื่อ \bar{J} แสดงถึงกระแสไฟฟ้าสุทธิที่ไหลผ่านไดอิเล็กทริกซึ่งกำหนดเป็นความแตกต่างระหว่างกระแสดักจับและกระแสที่ถูกปล่อยผ่านด้านใดด้านหนึ่ง (ซ้ายหรือขวา) ดังที่แสดงในรูป



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงแบบจำลองการขนส่งพาหะประจุแบบ TAT
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

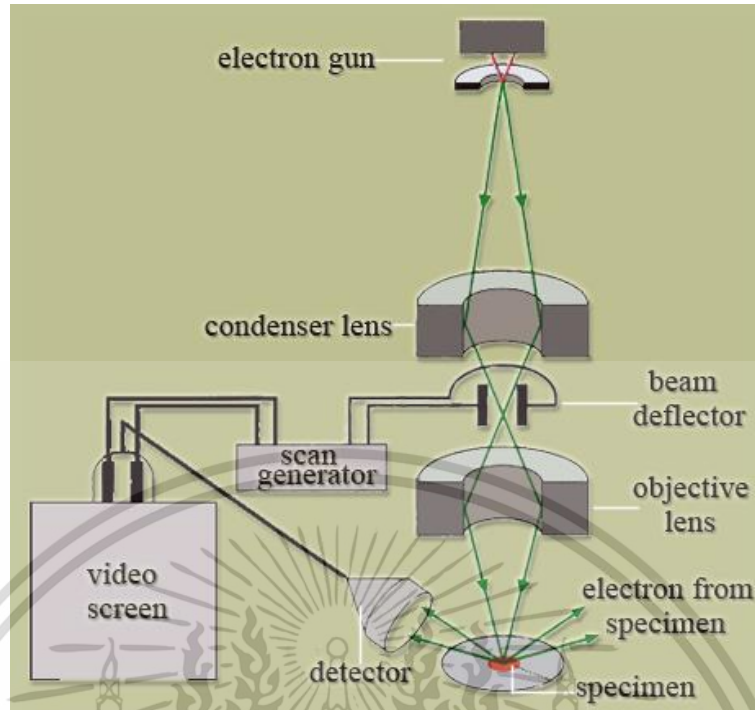
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่าง

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงมากนัก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) ซึ่งจะทำให้การประมวลผลภาพจากการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจโดยมีหลักการทำงานโดยอาศัยการกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด (Electron gun) โดยที่เมื่อลำอิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งตัวอย่างที่เป็นวัสดุจะเกิดจากการประกอบด้วยอะตอมต่างๆ จะทำให้สัญญาณที่สะท้อนกลับนำไปประมวลผลเป็นภาพพื้นผิวของตัวอย่างและองค์ประกอบของพื้นผิวตัวอย่างได้ ข้อดีของการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็คือ มีระยะชัดลึกสูงเนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นคลื่นของลำอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นและมีความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษา โครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิต ภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และ การกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลาย ขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Lithography) จะเห็นได้ว่า FESEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงส่วนประกอบและการำทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

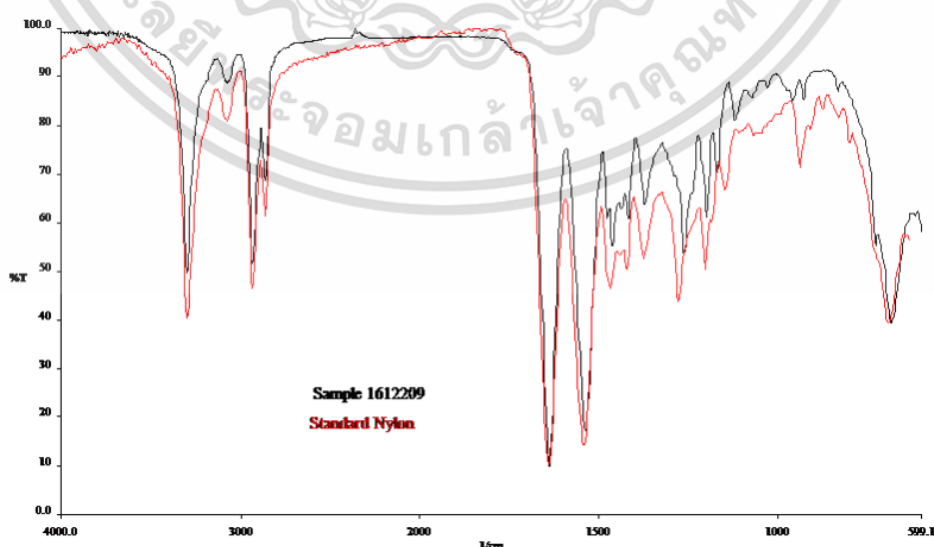
2.5.2 เครื่องวิเคราะห์ทางเคมีประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectroscopy)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ในการระบุสารนิยมใช้กับสารอินทรีย์สาร โพลีเมอร์และในบางกรณีอาจระบุวัสดุสารอนินทรีย์ วิธีการวิเคราะห์ FTIR นั้นทำโดยใช้แสงย่านอินฟราเรดเพื่อสแกนตัวอย่างทดสอบและสังเกตคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่าง โดยรังสีบางส่วนจะถูกดูดซับโดยตัวอย่าง และรังสีบางส่วนนั้นจะผ่านเข้าไปได้โดยที่รังสีส่วนที่ถูกดูดกลืนนั้นจะถูกแปลงเป็นพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานการสั่นสะเทือนโมเลกุลของตัวอย่าง และสัญญาณที่เป็นผลลัพธ์ที่เครื่องตรวจจับได้จะแสดงผลเป็นสเปกตรัมซึ่งแสดงถึงรายละเอียดระดับโมเลกุลของตัวอย่างที่เปรียบได้กับลายนิ้วมือในมนุษย์ซึ่งแต่ละโมเลกุลจะมีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นลายนิ้วมือไม่ซ้ำกันทำให้การวิเคราะห์ FT-IR เป็นหนึ่งในวิธีการที่ยอดเยี่ยมสำหรับการระบุองค์ประกอบทางเคมีของสารในตัวอย่าง

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ FT-IR จะเป็นเทคนิคที่กำหนดไว้สำหรับการควบคุมคุณภาพเพื่อประเมินวัสดุที่ผลิตในอุตสาหกรรมและมักจะเป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการวิเคราะห์ตัวอย่าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบลักษณะเฉพาะของแถบรังสีที่ถูกดูดซับจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความ

เปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของตัวอย่างรวมทั้งถึงสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในตัวอย่าง ตัวอย่างการใช้งานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยส่วนมากนั้น เช่น ระบุและกำหนดลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ไม่รู้จัก ระบุการปนเปื้อนในวัสดุและ ระบุสารเติมแต่งหรือสารที่เพิ่มหรือหายไปจากกระบวนการทางเคมี เป็นต้น การตีความข้อมูลที่ได้จาก ผลการวิเคราะห์นั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากผลลัพธ์ที่เป็นสเปกตรัมที่ถูกสร้างขึ้นนั้นเป็นฟังก์ชัน อนุกรมของการตอบสนองพลังงานที่ถูกดุดกลืนในตัวอย่าง (จึงได้ชื่อว่า Fourier transform infrared: FT-IR) แถบการดูดกลืนที่แสดงในสเปกตรัมมีความไม่ต่อเนื่องและมีการเสื่อมสภาพ และ จุดสูงสุดของพลังงานที่จำนวนคลื่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปรอบๆ ได้ที่อิงจากปัจจัยทางเคมีและปัจจัย อื่นๆ ดังนั้นจึงต้องมีค่าเปรียบเทียบเพื่อบ่งบอกว่ากลุ่มพลังงานรูปแบบใดที่จะบ่งบอกถึงสารชนิดใด อย่างแน่นอน ดังนั้นสเปกตรัมจึงต้องถูกตีความเป็นระบบทั้งหมดจึงจำเป็นต้องการนักวิเคราะห์ที่มี ประสบการณ์มากที่สุดในเทคนิคการวิเคราะห์ทั้งหมดเพื่อจำแนกข้อมูลผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้องและ แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วเทคนิคนี้จะเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพสำหรับการระบุวัสดุแต่การวิเคราะห์ FT- IR ยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือเชิงปริมาณในการหาปริมาณกลุ่มฟังก์ชันเฉพาะในตัวอย่างเมื่อมีความ เข้าใจในเชิงเคมีและการอ้างอิงมาตรฐานโดยที่ความเข้มข้นของการดูดกลืนแสงจะสัมพันธ์กับปริมาณ การทำงานที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น การใช้การวิเคราะห์ FT-IR สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อ กำหนดลักษณะปริมาณน้ำในตัวอย่างน้ำมันและระดับการเกิดออกซิเดชันและไนเตรดของน้ำมันและ ยังได้มีการพัฒนาวิธีการในการจำแนกลักษณะของตัวอย่างน้ำมันที่เป็นพาราฟินหรือแนฟเทนิค เป็น ต้น แต่อย่างไรก็ตามต้องสังเกตว่าเทคนิคการวิเคราะห์ FT-IR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ตัวอย่างขนาด เล็กโดยข้อมูลเพียงเล็กน้อยจากตัวอย่างสามารถได้รับผ่านความเข้มข้นของตัวอย่างเพียงเล็กน้อย เท่านั้น (โดยทั่วไปแล้วจะมีองค์ประกอบมากกว่า 5%)



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และการเปรียบเทียบผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในวัสดุศาสตร์เพื่อกำหนดโครงสร้างผลึกของวัสดุซึ่งทำงานโดยการฉายรังสีเอ็กซ์ตกกระทบจากนั้นวัดความเข้มและมุมกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ที่ได้หลังจากฉายไปยังตัวอย่าง โดยมีหลักในการวิเคราะห์ คือการระบุตัวอย่างตามรูปแบบการเลี้ยวเบนของแต่ละวัสดุและนอกจากเฟสของการเลี้ยวเบนแล้วยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับว่าโครงสร้างที่แท้จริงเบี่ยงเบนไปจากโครงสร้างที่ควรจะเป็นในอุดมคติไปมากน้อยเท่าไรที่มีที่มาจากความเข้มภายในและข้อบกพร่องของตัวอย่าง อะตอมที่มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกนั้นในขณะที่รังสีเอ็กซ์ถือได้ว่าเป็นคลื่นของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า อะตอมของผลึกจะกระจายรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่ผ่านการมีปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนของอะตอม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการกระเจิงแบบยืดหยุ่น โดยปกติการกระเจิงของอิเล็กตรอนจะสร้างคลื่นทรงกลมแบบปกติซึ่งส่วนใหญ่คลื่นเหล่านี้จะหักล้างซึ่งกันและกันผ่านการแทรกสอดแต่อย่างไรก็ตามคลื่นเหล่านี้ก็เสริมกันในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงตามกฎของแบร็กก (Bragg's Law) ทิศทางเฉพาะนั้นจะปรากฏเป็นจุดบนรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เรียกว่าการสะท้อน ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงเป็นผลมาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทบกับการกระเจิงของอิเล็กตรอนปกติ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ XRD เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างและมีประโยชน์ในการระบุเฟสและการจัดเรียงตัวของผลึกในตัวอย่างและยังบ่งบอกคุณสมบัติของโครงสร้างในตัวอย่างได้ไม่ว่าจะเป็น พารามิเตอร์โครงตาข่าย ความเครียด ขนาดเกรน องค์ประกอบเฟส ความหนาของฟิล์มบาง เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่องานวิจัย: Transition from direct to Fowler-Nordheim tunneling in chemically reduced graphene oxide film

นักวิจัยได้ทำการศึกษากลไกการขนส่งพาหะประจุในฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีความหนาน้อยกว่าระดับไมครอน โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงให้เห็นถึงการสลับค่าของกระแสไฟฟ้าสูงถึง 10^5 เท่าที่แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (Threshold voltage) และจากการสังเกตนั้นพบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษานั้นสอดคล้องกับปรากฏการณ์อุโมงค์ควอนตัมบนพื้นฐานของกลไกการขนส่งพาหะประจุซึ่งแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การสลับของกระแสไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงจากอุโมงค์ควอนตัมแบบตรง (Direct tunneling) ไปเป็นอุโมงค์ควอนตัมแบบ Fowler-

Nordheim (F-N tunneling) และการที่ไม่เกิดปรากฏการณ์การสลับขั้วของกระแสไฟฟ้าในกราฟแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายหลังจากการลอกกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนออกจากฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ยังเป็นตัวช่วยยืนยันได้ว่า กลุ่มออกซิเจนเหล่านี้และการเกิดปฏิสัมพันธ์ที่ลดลงระหว่างชั้นของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ติดกันนั้น มีบทบาทสำคัญสำหรับการขนส่งพาหะประจุและยังสามารถนำฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นี้ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์สวิตช์กระแสไฟฟ้าที่เป็นโลหะ เช่น อุปกรณ์ต้านทานไฟฟ้าแรงดันสูง

ชื่องานวิจัย: Reduced graphene oxide film with record-high conductivity and mobility

งานวิจัยนี้ระบุว่าจากการที่กราฟีนนั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมโดยที่มีกระบวนการการสังเคราะห์ในทางเคมีที่สามารถปรับขนาดได้และยังให้ผลตอบแทนที่สูง ทำให้มีการใช้วิธีการเหล่านี้อย่างแพร่หลายในการผลิตกราฟีน เช่น รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีค่าการนำไฟฟ้าและค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ (<1500 S/cm, <5 cm²/Vs ตามลำดับ) ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานในหลายๆด้าน ซึ่งในงานวิจัยนี้นักวิจัยรายงานว่าฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในงานวิจัยมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงมากถึง 6300 S/cm และค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้าที่สูงถึง 320 cm²/Vs ซึ่งเกิดจากกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 3000 K โดยที่ความท้าทายในกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนนี้คือจำเป็นต้องผ่านกระบวนการถึง 2 ขั้นตอนและยังใช้ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีลักษณะแผ่นแบบโคง ซึ่งการตรวจสอบว่าคุณสมบัติการขนส่งพาหะประจุของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนอย่างไรนั้น สามารถสังเกตได้จากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการรีดักชันขึ้น กลุ่มฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจนในฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปนที่เป็นศูนย์กลางของการกระเจิงนั้นจะค่อยๆ ถูกขจัดออกไป ทำให้ความหนาแน่นของพาหะประจุค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าและความคล่องตัวทางไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ค่าความยาวโลคัลไลเซชันจะสอดคล้องกับขนาดของโดเมน sp² ซึ่งมีขนาด 8.7 นาโนเมตรที่อุณหภูมิ 3000 K ซึ่งมีค่าเกิดกว่าในงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ข้อบกพร่องหรือสิ่งเจือปนในตัวอย่างลดน้อยลงและเกิดโดเมนที่มีขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างที่หนาแน่นจึงเป็นส่วนช่วยให้เกิดค่าการนำไฟฟ้าและความคล่องตัวทางไฟฟ้าที่สูงมาก

ชื่องานวิจัย: Exploration of the temperature-dependent correlations present in the structural, morphological and electrical properties of thermally reduced free-standing graphene oxide paper.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้นักวิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง
สัณฐานวิทยาและเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระที่ผ่านการรีดักชัน
ด้วยความร้อน ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นดำเนินการโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด
(FT-IR), การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิครามาน (Raman) เพื่อพิสูจน์ถึงจุดเริ่มต้นของ
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สำคัญซึ่งมีลักษณะเฉพาะโดยการกำจัดฟังก์ชันออกซิเจนที่เกิดขึ้นในช่วง
อุณหภูมิของกระบวนการรีดักชันที่ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส และผลลัพธ์ที่ได้ยังได้รับการยืนยัน
จากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาจากการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(SEM) และการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังอะตอม (AFM) การวิเคราะห์ธาตุแสดงให้เห็นว่าแผ่น
กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีปริมาณธาตุคาร์บอนที่ 85 เปอ
เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีระดับออกซิเจนเหลือ 13.31 เปอเซ็นต์โดยน้ำหนักสำหรับอุณหภูมิของการ
รีดักชันสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นหลักฐานว่ามีข้อบกพร่องของตำแหน่งแบบที่ว่างอยู่ซึ่งขัดขวาง
ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการรีดักชัน การวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าโดยละเอียดและการ
วัดผลความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ดำเนินการภายใต้วิธีวัดสี่จุดที่เผยให้เห็นถึงค่าความ
ต้านทานของตัวอย่างที่ลดลงหลังจากผ่านกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศา
เซลเซียสที่สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสัณฐานวิทยาเป็นอย่างดี ข้อมูลที่ได้
จากการวิจัยนี้นั้นจะมีความสำคัญสำหรับการใช้งานในอนาคตต่อไปโดยที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าและ
คุณสมบัติเชิงกลของกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะถูกนำไป
ประยุกต์ใช้งานต่อไปสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ

3.1.1 สังเคราะห์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระด้วยเทคนิคการใช้เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration)

ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระถูกเตรียมโดยวิธีการฮัมเมอร์ (Hummer's Method) [77] โดยเริ่มจากการนำสารละลายกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่ผ่านการสังเคราะห์จากวิธีการข้างต้นมากรองด้วยวิธีการกรองด้วยสุญญากาศ โดยใช้เซลล์ลูโลสไนเตรเป็นตัวกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอนเพื่อให้ได้กราฟีนออกไซด์ที่กระตาดกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร โดยที่ความเข้มข้นของกราฟีนออกไซด์ที่อยู่บนกระตาดกรองจะมีค่าต่างกันเนื่องจากการเจือจางสารละลายกราฟีนออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นด้วยน้ำกลั่น บริสุทธิ์ไร้ไอออนและสุดท้ายฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์จะถูกนำออกจากกระตาดกรองด้วยแหวน หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีต่อมาฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระนี้จะนำไปผ่านกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อน (Thermal reduction) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในเตาหลอมแบบมาตรฐานภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์สูง (99.995%)

สำหรับการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้หลังจากการเตรียม (ดังรูปที่ 3.1) มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและติดแปะด้วยเงินบนหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะของแผ่นวงจรพิมพ์สำเร็จรูปขนาดเล็กที่มีจำหน่ายทั่วไปดังแสดงในรูป 3.1 โดยตัวอย่างจะมีความยาว 2 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตรและมีความหนาประมาณ 2 ถึง 2.5 ไมครอนตามที่วัดจากส่วนตัดขวางผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยจะแสดงในรูป 3.1 นอกจากนี้ยังมีรูปภาพแสดงลักษณะพื้นผิวที่แสดงด้านล่างของรูป 3.1 แล้วจากนั้นจะทำการบรรจุวงจรพิมพ์สำเร็จรูปที่มีตัวอย่างอยู่ลงในเบ้าบรรจุแบบคู่ (Dip socket) ของเครื่องมือแช่แข็งแบบไหลต่อเนื่อง (Cryostat) รุ่น Janis TM ST-100 ภายใต้สุญญากาศแล้วจึงทำการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบแอสสูงทั้งที่อุณหภูมิห้อง (300K) และระหว่างช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 300 เคลวินและสุดท้ายทำการทดลองทางไฟฟ้าแบบวัดกลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนทั้งแบบ 2 ขั้วและ 4 ขั้วตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระหลังจากการลอกออกจากกระดาษกรองเมมเบรน

3.1.2 กระบวนการรีดักชันด้วยความร้อน (Thermal Reduction Process)

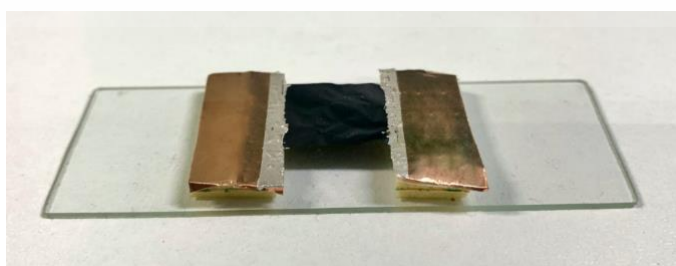
โดยปกติแล้วเป็นกระบวนการที่ใช้งานเพื่อการลดสารประกอบในวัสดุโดยใช้ความร้อนเข้ามาช่วยซึ่งในที่นี้ก็คือการลดกลุ่มฟังก์ชันออกไซด์ออกจากฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ เพื่อให้เกิดการรีดิวซ์เกิดเป็นฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระ ในงานวิจัยครั้งนี้ทำการรีดิวซ์ฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ที่มีเป็นแก๊สเฉื่อยที่หน้าที่นำหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ระเหิดออกจากฟิล์มกราฟีนออกไซด์ที่อยู่ในท่อของเครื่องปลูกฟิล์มแบบตกสะสมไอเคมี (CVD) ในเครื่องที่แสดงในรูป 3.2 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้ได้รีดิวซ์ออกไซด์ที่มีคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์



รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนและฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

3.1.3 ขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระหลังจากกระบวนการรีดักชันด้วยความร้อนมาสร้างเป็นอุปกรณ์ในทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำไปใช้ในการทดลองสำหรับศึกษาคุณสมบัติเฉพาะทางด้านไฟฟ้าของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ โดยได้นำแผ่นทองแดง (Copper plate) มาใช้สำหรับขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวข้างต้นซึ่งยึดกับฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่อย่างอิสระด้วยกาวเงิน (Silver paste) ดังที่แสดงในรูป 3.3 ที่วัสดุทั้งสองอย่างนั้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีมากเพื่อเป็นส่วนช่วยในการลดค่าความต้านทานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้จะอยู่บนแผ่นกระจกแก้ว (Glass slide) ที่เป็นวัสดุที่เป็นของแข็ง



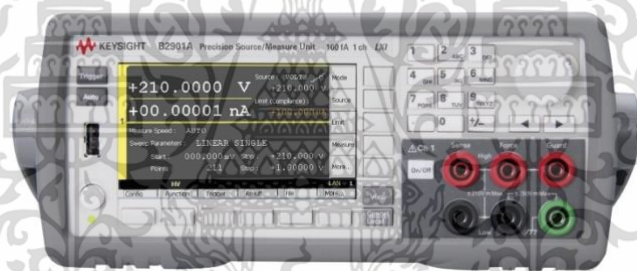
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

3.2.1 การเตรียมชุดทดลองสำหรับศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้นำหน่วยการวัดแหล่งจ่าย (Source Meter Unit: SMU) ดังแสดงในรูป 3.4 ที่มีคุณสมบัติในการเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกันซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานต่างๆ สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระนั้นทำการทดลองกับเครื่องมือหน่วยการวัดแหล่งจ่ายโดยอาศัยสายคีบปากหนีบ (Alligator Clip) ตรงบริเวณขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์เพื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแล้วทำการวัดกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อัตราความเข้มข้นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.4 เครื่องมือหน่วยการวัดแหล่งจ่าย (Source Meter Unit: SMU) รุ่น B2901A จาก Keysight Technology

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

เริ่มแรกจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ เพื่อดูปัจจัยของความเข้มข้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยทำการเปรียบเทียบจากการทดลองที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจาก 0 – 1 โวลต์สำหรับทุกความเข้มข้นของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

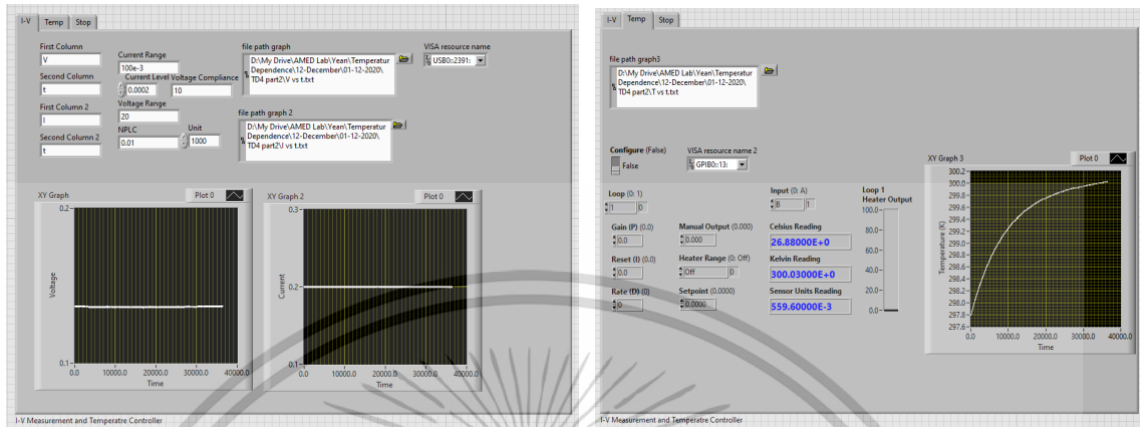
ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จากฟิล์มรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระภายใต้การไบอัสด้วยจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (High-bias study) เพื่อสังเกตผลกระทบที่เกิดจากการไบอัสด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงซึ่งผลต่อสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสที่จ่ายให้กับอุปกรณ์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สำหรับขั้นตอนนี้ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างสำหรับการทดลองก็คือ ขนาดของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระที่นำมาทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการทดลอง และวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้จะศึกษาวัฏจักรของกระแสและแรงดันสำหรับอุปกรณ์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยจะค่อยๆ จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่อัตราคงที่จนถึงค่าแรงดันค่าหนึ่งและลดแรงดันไฟฟ้ากลับมาที่จุดเริ่มต้นของการทดลองซึ่งจะนับเป็น 1 วัฏจักรจากนั้นจะทำการค่อยๆ เพิ่มค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายสำหรับวัฏจักรต่อไป มาโดยใช้อัตราคงที่สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นสำหรับวัฏจักรทั้งหมดสุดท้ายจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไบอัสด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงภายใต้เงื่อนไขของเวลาซึ่งเริ่มต้นด้วยการค่อยๆ จ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วยอัตราคงที่ไปจนถึงแรงดันไฟฟ้าค่าที่สนใจโดยค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะจ่ายอย่างคงที่ที่เวลาผ่านไปโดยจะทำการกำหนดขอบเขตของกระแสสูงสุดสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำไปทดลอง โดยในจุดนี้เพื่อเป็นการป้องกันการทำลายอุปกรณ์อันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลมากเกินไปในที่สุด

3.2.3 การเตรียมชุดทดลองสำหรับการศึกษากลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนโดยปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้อย่างอิสระ

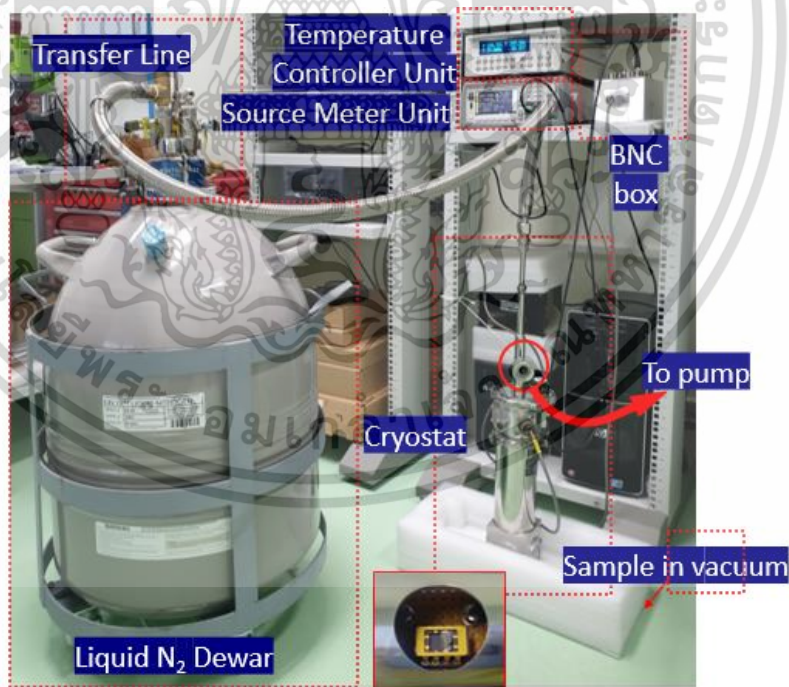
สำหรับงานที่ศึกษากลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะเริ่มจากการคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ภายใต้ช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยในการทดลองครั้งนี้เราได้นำเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็ง (Cryostat) มาประยุกต์ใช้งานในการวิจัยส่วนนี้ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องมือหน่วยการวัดแหล่งจ่ายและเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) โดยการเดินสายไฟภายในเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็งกับสายไฟใหม่ทั้งหมดและที่ส่วนหัวทำความเย็น (Cold head) ภายในเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็งนั้นเราได้ทำการปรับปรุงส่วนนี้สำหรับตัวอย่างในการทดลองนี้ซึ่งได้นำช่องเสียบของวงจรรวม (Chip carrier) และซ็อกเก็ตดิป (DIP socket) บนแผ่นพิมพ์วงจรที่อยู่บนแผ่นทองเหลืองโดยที่แผ่นทองเหลืองนี้เป็นส่วนที่สัมผัสกับส่วนหัวทำความเย็นของเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็งและได้ทำการเขียนโปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมระบบระหว่างเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็งกับหน่วยการวัดแหล่งจ่ายและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 3.5 สำหรับในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

อุณหภูมิห้องในงานวิจัยนี้ได้ใช้ในโครงงานเหล่านี้สำหรับอุณหภูมิตั้งแต่ 77 เคลวิน จนถึงอุณหภูมิห้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในเครื่องวัดตัวอย่างที่จุดเยือกแข็งมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิได้มากที่สุดที่ 200 องศาเซลเซียส โดยเครื่องมือดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 3.6 ชุดทดลองการศึกษากลไกการขนส่งของอิเล็กตรอนภายใต้ปัจจัยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติจำเพาะของวัสดุ

เครื่องวิเคราะห์หาค่าประจวบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FT-IR Spectroscopy) ถูกนำมาใช้วัดฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อยในช่วงจำนวนความยาวคลื่น 500 ถึง 4000 ต่อเซนติเมตรด้วยระบบ Bruker Senterra

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ก็ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึกทั้งของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระทั้งก่อนและหลังการบำบัดด้วยการหลอมด้วยกระแสไฟฟ้า (Current Annealing Treatment) โดยในที่นี้ใช้รุ่น Rigaku Miniflex ในช่วงความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอมและระยะ 2 θ เท่ากับ 5 ถึง 60 องศาที่กวาดผ่านช่วงละ 0.02 องศา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (FE-SEM) รุ่น JSM-5800 LV ถูกนำมาใช้งานเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุและประเมินความหนาของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ตลอดจนเพื่อวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนและออกซิเจนโดยใช้เทคนิคการกระจายพลังงาน (EDX)

การจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปอัสสูงแบบ 2 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะทางไฟฟ้าจำเพาะของแรงดันและกระแสของวัสดุโดยใช้เครื่องหน่วยการวัดแหล่งจ่าย (SMU) รุ่น Keysight B2901A และทำการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีวัดแบบ 4 ขั้วโดยการจ่ายกระแสคงที่ที่ 100 ไมโครแอมป์ผ่านขั้วคู่ด้านนอกและทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมที่ขั้วคู่ด้านในโดยใช้มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล รุ่น Keysight 34461A

บทที่ 4

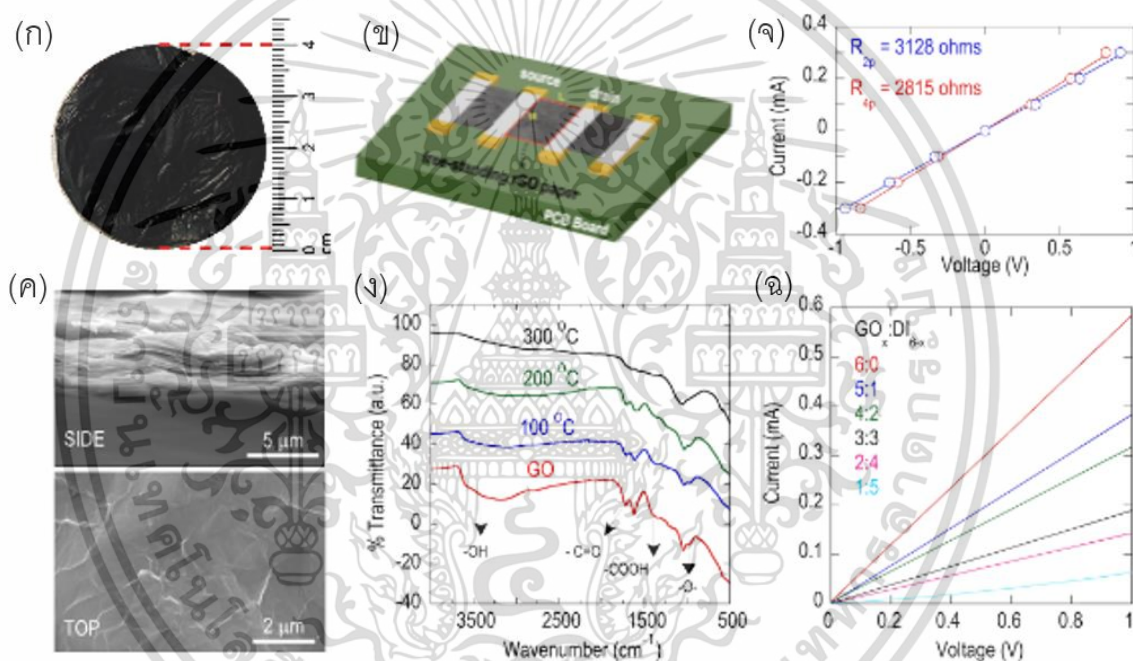
ผลการทดลอง

4.1 กระบวนการรีดักชันกราฟีนออกไซด์ด้วยความร้อนเพื่อให้ได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อย

จากรูป 4.1 แสดงข้อมูลค่าการส่องผ่านจากเครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (FT-IR) ที่วัดได้จากฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์และฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียสตามลำดับเป็นเวลา 30 นาทีและจากร่องรอยของฟิล์มบางกราฟีนออกไซด์แบบดั้งเดิมนั้น จากกราฟจะแสดงจุดยอดที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนต่างๆ ได้แก่ กลุ่มไฮดรอกซิล (-OH), กลุ่มคาร์บอนิล (C=O), กลุ่มคาร์บอกซิลิก (-COOH) และกลุ่มอีพอกไซด์ (-O-) เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนที่ 3300, 1750, 1400 และ 1100 ต่อหนึ่งหน่วยเซนติเมตรตามลำดับและที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (หรือเรียกอีกอย่างว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อย) จะสังเกตได้ว่ากลุ่มไฮดรอกซิล, กลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มคาร์บอกซิลิกถูกกำจัดออกไปแต่ทว่ายังคงมีจุดยอดของฟังก์ชันกลุ่มอีพอกไซด์ที่ไม่ได้ถูกกำจัดออกไปซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนนี้มีความแข็งแรงแม้จะผ่านการรีดักชันด้วยความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียสก็ยังไม่ถูกกำจัดออกไป จึงได้เลือกตัวอย่างที่ถูกรีดักชันด้วยช่วงอุณหภูมินี้ไปศึกษาการสอดคล้องซึ่งเน้นเฉพาะการทำความเข้าใจผลกระทบของอุณหภูมิของการรีดักชันด้วยความร้อนต่อคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้การวัดความต้านทานความต้านทานด้วยวิธีการวัดเข็ม 4 จุดซึ่งสามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างจากฉนวนไปเป็นตัวนำที่ดีในช่วงอุณหภูมิของการรีดักชันที่ช่วง 250 – 300 องศาเซลเซียสฟังก์ชันอีพอกไซด์นั้นจะถูกกำจัดที่อุณหภูมิสูงของการรีดักชันสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสเท่านั้น

โดยการเปรียบเทียบข้อมูลจากกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสระหว่างการทดลองวัด 2 ชั้นและ 4 ชั้นของอุปกรณ์หนึ่งตัว (รูปที่ 4.1จ) ค่าความต้านทาน R_c แสดงให้เห็นค่าความต้านทานหน้าผิวสัมผัสมีค่าประมาณ 150 โอห์มซึ่งมีค่าเพียง 5 เพอร์เซ็นต์ที่ได้จากการเปรียบเทียบจากการวัดแบบ 4 ชั้น โดยแม้ว่าจะไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในส่วนนี้เลยละเอียดย แต่โดยทั่วไปแล้วพบว่าค่าความต้านทานหน้าผิวสัมผัส R_c อยู่ในเกณฑ์ดี โดยมีค่าอยู่ในช่วงหนึ่งในสิบของค่าความต้านทานของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และอาจจะสามารถมองข้ามได้

รูปที่ 4.1จ แสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสจากการทดลองวัดแบบ 2 ขั้วโดยจ่ายแรงดันไบอัสต่ำที่อุณหภูมิห้องสำหรับฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นแตกต่างกันโดยได้รับจากวิธีการเจือจางสารละลายกราฟีนออกไซด์ในขั้นตอนการเตรียมด้วยน้ำบริสุทธิ์ไร้ไอออนก่อนการกรองด้วยสุญญากาศ โดยในช่วงการทดลองที่วัดได้นั้นกราฟความสัมพันธ์แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมแบบโอห์มมิกที่ตีมากในทุกความเข้มข้นและความเข้มข้นที่แตกต่างกันส่งผลให้ความต้านทานที่ได้นั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำบริสุทธิ์ไร้ไอออนต่อสารละลายกราฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.1 (ก) ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้รับจากวิธีการกรองด้วยสุญญากาศและตามด้วยการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (หรือเรียกว่าฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อย) (ข) แผนภาพแสดงการตั้งค่าการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในขนาดมิลลิเมตรทู่บนขั้วสัมผัสของบอร์ดพีซีบีมาตรฐาน (ค) ภาพตัดขวางจาก SEM (ด้านบน) แสดงความหนาโดยเฉลี่ยและแต่ละชั้นที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันเพียงเล็กน้อยและการสแกนพื้นผิว (ด้านล่าง) เผยให้เห็นโครงสร้างท่อกายภาพของตัวอย่างที่ศึกษา (ง) ผลการวิเคราะห์ FT-IR ที่ได้รับจากตัวอย่างที่ได้หลังจากการกรองด้วยสุญญากาศและการรีดักชันด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 10 นาที (จ) การเปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

เชื่อมต่อ 2 ขั้วและ 4 ขั้วสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวแทน (กว้าง 2 มม. ยาว 2 มม. และอัตราส่วนความเข้มข้น $x = 6$) แสดงให้เห็นถึงความต้านทานของผิวสัมผัสที่มีอยู่เพียง 5 เปอร์เซ็นต์จากความต้านทานของตัวอย่าง (ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำแบบ 2 ขั้วของตัวอย่างที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกันที่ได้รับจากการผสม (ในอัตราส่วนที่ระบุ) ของสารละลายกราฟีนออกไซด์ที่เตรียมไว้กับน้ำ DI

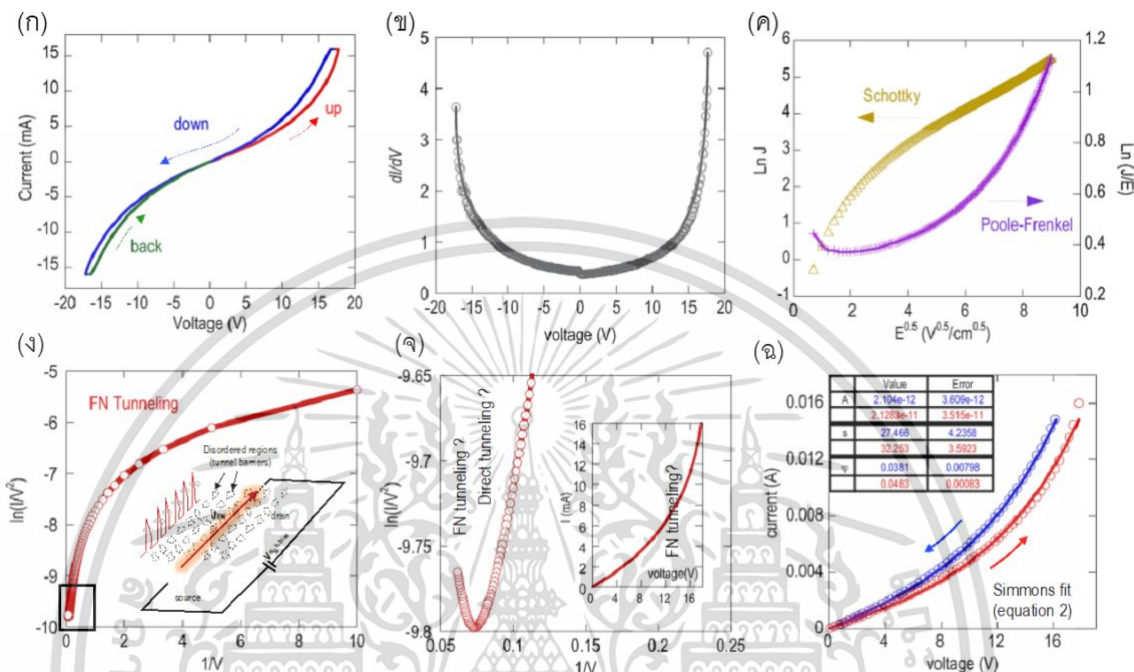
4.2 ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าพื้นฐานจากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงและแบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุ

ในรูป 4.2ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า จากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงหนึ่งครั้งจากหนึ่งในอุปกรณ์ โดยทำการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบกวาดด้วยอัตรา 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ทั้งในทิศทางไฟฟ้าบวกและลบซึ่งเห็นได้ชัดว่าในขณะที่กราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง +/- 5 โวลต์และหลังจากนั้นกราฟจะแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในรูป 4.2ข

นอกเหนือจากนี้ในรูป 4.2ก จากกราฟจะสามารถสังเกตพฤติกรรมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ได้อย่างชัดเจนระหว่างกระบวนการจ่ายแรงดันแบบกวาดทั้งแบบไปข้างหน้าและถอยกลับหลัง โดยพฤติกรรมที่ก่อให้เกิดการทำงานแบบนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดเพิ่มเติมในภายหลัง โดยในกราฟนี้จะเน้นเฉพาะกราฟแรงดันและกระแสที่ได้จากการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าตั้งแต่ 0 ถึง 17 โวลต์ โดยทั่วไปแล้วนั้นสำหรับระบบโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบอย่างเช่น กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ กลไกการขนส่งประจุที่แรงดันไบอัสสูงนั้นอาจอยู่ภายใต้กลไกการฉีดพาหะ (Injection) ที่จำกัดเช่น พฤติกรรมช็อตกี (Schottky) และอุโมงค์ขนส่งแบบ F-N (F-N Tunneling) หรืออยู่ภายใต้กลไกอื่นๆ จำนวนมาก เช่น กลไก Poole-Frenkel และ SCLC เป็นต้น [78,79] โดยได้ทำการนำกราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสมาทำการพล็อตใหม่ในความสัมพันธ์ของ $\ln J$ เทียบกับ \sqrt{E} ดังแสดงในรูป 2ค แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟแสดงความสัมพันธ์ข้างต้นซึ่งบ่งชี้ว่าการแผ่รังสีความร้อนของแบบจำลองพฤติกรรมแบบช็อตกีซึ่งไม่น่าจะเป็นกลไกการขนส่งที่โดดเด่นตามที่ระบุไว้ในงานวิจัยของ R.S. Kajeen และคณะ [80], โดยการแผ่รังสีของกลไกแบบจำลองช็อตกีที่ถูกขวางกั้นวงโคจรของโมเลกุลสูงสุด (HOMO) และการโคจรของโมเลกุลที่มีที่ว่างต่ำสุด (LUMO) โดยกำแพงอิเล็กทรอนิกส์และโฮลโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีไม่มีเกต นอกจากนี้ลักษณะความเป็นสมมาตรที่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสและแรงดันยังทำให้ตัดความเป็นไปได้ของกลไกแบบจำลองการขนส่งแบบช็อตก็ออกไปได้อีกด้วย [81] และจากกราฟในรูป 2ค นั้นการที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นยังเป็นอีกหนึ่งตัวบ่งชี้ที่บ่งบอกว่าไม่มีกลไกของแบบจำลอง Poole-Frenkel ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.2 (ก) การทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งจากตัวอย่างทั้งหมดเพื่อศึกษาผลการทดลองของการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าและข้างหลังตลอดจนพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอรีซิสซึ่งออกมาเป็นผลลัพธ์ทั้งที่สับวกและลบของแรงดันไฟฟ้า (ข) ผลอนุพันธ์ที่เผยให้เห็นถึงความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมากซึ่งมีลักษณะจากการที่กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงให้เห็นจากผลการทดลองการกวาดแรงดันไฟฟ้าในรูป 2ค (ค) ผลการทดลองการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในทิศทางบวกของผลการทดลองในรูป 2ก ที่นำมาลือตใหม่ด้วยแบบจำลอง Schottky ($\ln J vs \sqrt{E}$) และ Poole-Frenkel $\ln J/E vs \sqrt{E}$ (ง) แบบจำลอง FN Tunneling ($\ln I/V^2 vs 1/V$) ของผลการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในทิศทางบวกของผลการทดลองในรูป 2ก และรูปย่อยแสดงให้เห็นถึงแผนภาพของ Distributed tunnel junction network (จ) ภาพขยายของกราฟความสัมพันธ์ในรูป 2ง ที่เผยให้เห็นจุดเปลี่ยนผันของกลไกการขนส่งพาหะประจุจากแบบจำลองแบบ Direct tunneling เป็น FN tunneling และรูปย่อยแสดงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าดั้งเดิมที่ช่วยยืนยันแบบจำลอง FN tunneling ในเครื่องหมายสีแดง (ฉ) การวิเคราะห์ความเข้ากันของผลการทดลองโดยใช้สมการของซิมมอน (Simmon's Formular) และรูปย่อยแสดงตารางสรุปพร้อมข้อมูลที่พอดีสำหรับค่า A, s and ϕ_B .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.2ง แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของกราฟกระแสและแรงดันที่นำมาพล็อตกราฟใหม่ ในความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I/V^2$ กับ $1/V$ เพื่อตรวจสอบถึงกลไกแบบจำลองอุโมงค์ F-N ในตัวอย่าง รีติวซ์กราฟีนออกไซด์จากหลักฐานที่แสดงในรูป 4.2จ เห็นได้ชัดว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนของความชันที่เปลี่ยนจากบวกไปเป็นลบซึ่งสามารถสังเกตได้ที่กราฟบริเวณแรงดันไฟฟ้ามีค่า 8 โวลต์ (ดูจากบริเวณที่แรงเงาจากรูปที่แทรกในรูป 4.2จ) ซึ่งจากกราฟอันนี้เองจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมการขนส่งประจุในตัวอย่างจากการเกิดอุโมงค์ขนส่งโดยตรง (Direct Tunneling) ไปเป็นอุโมงค์ขนส่งแบบ F-N ที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการซิมมอน (Simmons equation) [82]

$$J = \frac{e}{2\pi\hbar s^2} \left[\left(\phi_B - \frac{eV}{2} \right) e^{-\frac{4\pi s\sqrt{2m}}{\hbar} \sqrt{\phi_B - \frac{eV}{2}}} - \left(\phi_B + \frac{eV}{2} \right) e^{-\frac{4\pi s\sqrt{2m}}{\hbar} \sqrt{\phi_B + \frac{eV}{2}}} \right] \quad (16)$$

เมื่อ J คือค่าความหนาแน่นของกระแสภายในอุโมงค์, e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน, \hbar คือค่าคงที่ของพลังค์, s คือขนาดความกว้างของกำแพง, ϕ_B คือค่าความสูงของกำแพง, m คือมวลของอิเล็กตรอน และ V คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมฟิล์มบาง เพื่อความสะดวกในการคำนวณด้วยตัวเลข ดังนั้นสมการที่ 16 ข้างต้นอาจถูกเขียนใหม่ได้เป็น [82]

$$J = \frac{(6.2 \times 10^{10})}{s^2} \left[\left(\phi_B - \frac{V}{2} \right) e^{-1.025s \sqrt{\phi_B - \frac{V}{2}}} - \left(\phi_B + \frac{V}{2} \right) e^{-1.025s \sqrt{\phi_B + \frac{V}{2}}} \right] \quad (17)$$

เมื่อ J คือค่าที่แสดงในหน่วย A/cm และ s คือค่าที่แสดงในหน่วยอังสตรอม

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แบบจำลองของซิมมอนนั้นได้รับการบ่งบอกว่าเป็นแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของตัวอย่างรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดักชันทางเคมีในขนาดมิลลิเมตรตามที่ได้ระบุไว้ในงานวิจัยอ้างอิง [70] ตามที่ผู้เขียนได้กล่าวไว้ว่าฟิล์มบางรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ในขนาดมิลลิเมตรนั้นอาจแสดงให้เห็นถึงการประกอบกันของโครงข่ายการจัดเรียงตัวของสิ่งกีดขวางภายในอุโมงค์ทั้งการจัดเรียงแบบแถวและแบบขนานที่ได้เลียนแบบการมีอยู่ของโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบที่กระจายไปทั่วฟิล์มบางรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ (สามารถดูรูปประกอบได้ในส่วนแทรกของรูป 2ง) ซึ่งตามสมมติฐานที่ว่ามานี้ได้มีการเสนอสมการของซิมมอนที่ผ่านการปรับปรุงแล้วเพื่อนำไปใช้ได้พอดีกับการทดลองหาค่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดันในตัวอย่าง โดยเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้โดยเฉลี่ยแล้วตกคร่อมสิ่งกีดขวางในอุโมงค์ n_2 ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม

และกระแสรวมทั้งหมดภายในอุโมงค์นั้นเกิดจากรานำไฟฟ้าของเส้นทาง n_1 และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกคร่อมที่ทำการขวางกั้นอุโมงค์แต่ละอันถูกกำหนดว่ามีค่าเป็น V/n_2 ดังนั้นจากสมการที่ 2 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$J = \frac{(6.2 \times 10^{10})}{s^2} \left[\left(\phi_B - \frac{V}{2n_2} \right) e^{-1.025s \sqrt{\phi_B - \frac{V}{2n_2}}} - \left(\phi_B + \frac{V}{2n_2} \right) e^{-1.025s \sqrt{\phi_B + \frac{V}{2n_2}}} \right] \quad (18)$$

โดยที่ความหนาแน่นของกระแส $J = I/A = I/(n_1 \times A')$ นั่นคือ เมื่อ A คือ ส่วนตัดขวางรวมของอุโมงค์ที่มีประสิทธิภาพทั้งหมดและ A' คือ ส่วนตัดขวางของอุโมงค์ที่มีประสิทธิภาพแต่ละอัน

จากแสดงในรูป 4.2 ฉ แม้ว่าสมการที่ 3 จะแสดงแบบจำลองที่พอดีกับผลการทดลองที่ได้สำหรับการกวาดแรงดันไฟฟ้าไบอัสทั้งทางบวกและลบ พบว่าแบบจำลองของซิมมอนที่ได้รับการเสนอมานั้นไม่เหมาะสมด้วยเหตุผลบางประการ ประการแรกคือ เมื่อทำการสมมติ ค่า $n_1 = 10^{10}$ และ $n_2 = 500$ ตามที่รายงานไว้ในบทความที่ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ [70] พบว่าค่าความสูงและความกว้างของตัวขวางกั้นที่ได้จากการทดลองตรงกันกับแบบจำลองแต่ที่ค่าส่วนตัดขวางของอุโมงค์นั้นไม่สมเหตุสมผลเมื่อพบว่า $\phi_B \sim 0.05$ อิเล็กตรอนโวลต์และ $s \sim 32$ อังสตรอมไม่สามารถให้ค่าที่มีความหมายสำหรับส่วนตัดขวางของอุโมงค์ซึ่งพบว่า $A \sim 2.1 \times 10^{-11}$ (หรือประมาณ 2100 nm^2) และ $A' \sim 2.1 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ (หรือประมาณ $\sim 2.1 \times 10^{-7} \text{ nm}^2$). ตามที่แสดงในส่วนแรกของรูป 4.2 ฉ แสดงให้เห็นว่ามีส่วนที่คล้ายกันกับพารามิเตอร์เหล่านี้ที่ได้จากการทดลองจากการกวาดแรงดันไบอัสแบบย้อนกลับในรายงานระบุว่าค่าภาพตัดขวางทางกายภาพของตัวอย่างมีค่าประมาณ 0.4×10^{-4} ตารางเซนติเมตรดังนั้นจากพารามิเตอร์ข้างต้นค่าที่แยกออกมาเป็น A และ A' จึงไม่สมจริงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในขณะที่ประการที่ 2 ค่าของ n_1 และ n_2 มีค่าต่างกันเกือบสิบล้านเท่าซึ่งเป็นอีกครั้งที่บ่งบอกว่าผลที่ได้ไม่นั้นไม่สมเหตุสมผลเมื่อพิจารณาจากข้อเท็จจริงที่ว่าขนาดของตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่วัดได้นั้นสามารถเปรียบเทียบได้ด้วยขนาดของความกว้างและความยาวของตัวอย่าง เช่น สมมติว่าฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ประกอบด้วยส่วนของกราฟีนออกไซด์ที่เป็นฉนวนกั้นอุโมงค์ที่มีความยาวประมาณ 3 นาโนเมตรซึ่งควรจะให้ผลว่าจำนวนตัวขวางกั้นอุโมงค์ทั้งหมดประมาณ 3×10^6 ต่อระยะ 2 มิลลิเมตรของระยะของขั้วฉนวนสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสมมติดังกล่าวจะทำให้ได้ผลสำหรับ n_2 เป็น $\phi_B \gg eV/2n_2$ และกระแสที่ได้จากสมการที่ 3 จะมีค่าเป็นศูนย์จากการค้นพบนี้ทำให้เชื่อว่าบทบาทของแบบจำลองกลไกอุโมงค์ F-N ที่สังเกตได้ในพฤติกรรมของความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในการทดลองสำหรับตัวอย่างขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตรนั้นยังคงไม่ชัดเจน จึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมต่อไปเพื่อให้เข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของขดลวดของตัวอย่างภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงนั้น

ต่อมาจึงได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมความเป็นฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) จากกราฟแสดงลักษณะของกระแสและแรงดันจากรูป 4.2ก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพฤติกรรมฮิสเทอรีซินั้นอาจเป็นผลที่ได้มาจากกระบวนการดักจับพาหะประจุหรือความร้อนที่ใดจากกระแสไฟฟ้า (Joule heating) หรือจากทั้งสองแหล่งที่มาซึ่งจากที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้ ลักษณะทั่วไปของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีข้อบกพร่องนั้นหมายความว่า จะเป็นตัวดักจับพาหะประจุที่มีความหนาแน่นสูงและในขณะเดียวกันคุณสมบัติความเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าขึ้นเป็นจำนวนมากภายใต้การให้สนามไฟฟ้าแรงสูง ในขณะที่กระบวนการดักจับพาหะประจุนั้นโดยทั่วไปแล้วเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นมาใหม่ได้ที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดอันจำเพาะเจาะจงของอัตราส่วนเวลาสำหรับกระบวนการดักจับพาหะประจุและกระบวนการทำลายการดักจับพาหะประจุซึ่งพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันนั้นที่เกิดจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าอาจมีทั้งส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และส่วนที่ไม่สามารถกู้คืนได้ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกระจายความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพของพื้นผิวที่เป็นตัวรองรับและความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าจากการทดลองที่วัดได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบกวาดไปข้างหน้าและย้อนกลับที่อาจอธิบายได้ในแง่ของการเปลี่ยนแปลงของการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่เกี่ยวข้อง อุณหภูมิและในขณะที่ยุติพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยของ S. Pandey และคณะ [50] มีแนวโน้มมากที่สุดที่คล้ายจะเป็นพฤติกรรมนี้และเราเชื่อว่าส่วนใหญ่นั้นจะขาดหายไปในตัวอย่างไม่เนื่องจากธรรมชาติของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่อย่างอิสระและในทางตรงข้ามพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่ไม่สามารถกู้คืนได้นั้นบ่งชี้ไปที่การปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างให้เพิ่มขึ้นอย่างถาวรซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวออกของฟังก์ชันออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้างเดิมของโครงข่ายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นได้ด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิที่จำเป็นสำหรับการแยกตัวออกของฟังก์ชันออกซิเจนดังกล่าวจากความร้อนอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่มากเพียงพอ

หลักฐานของกระบวนการต่างๆ เหล่านี้สามารถเห็นได้ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4.3ก-จ โดยจากการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการวัดตัวอย่างโดยใช้การหน่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นในแต่ละกระบวนการ (15 นาที) ในระหว่างการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าและวัดกระแสแบบไปและกลับในแต่ละครั้งของการทดลอง สมมติว่ามีกระบวนการดักจับพาหะประจุเกิดขึ้น การหน่วงเวลานี้จะช่วยให้แน่ใจว่ามีเวลาเพียงพอสำหรับกระบวนการสลายการ

ดักจับพาหะประจุซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้ารีเซ็ตกลับไปเป็นค่าเริ่มต้นได้ ดดยทั่วไปแล้วนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษานี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลนี้ การตีพิมพ์หรือการนำข้อมูลนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์เป็นสิ่งต้องห้าม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสลายการดักจับพาหะประจุอาจใช้เวลาหลายนาที่เมื่อเทียบกับเวลาในมาตราส่วนระดับไมโครวินาทีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสลายการดักจับพาหะประจุ [83,84] และสำหรับเวลาการหน่วงที่นานมากนั้นจะสมมติเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุดสำหรับกระบวนการสลายการดักจับพาหะประจุ

ดังที่เห็นในรูป 4.3ก การจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบกวาดสำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำ (0-3 V) ส่งผลให้ไม่มีพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสดังที่เห็นได้ชัดจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ทับซ้อนกันทั้งของการทดลองกวาดแรงดันไฟฟ้าทั้งไปข้างหน้าและข้างหลังนอกจากนี้ การทดลองซ้ำหลังจากการหน่วงเวลาก็ยังคงให้ผลการทดลองของกราฟที่ซ้อนทับกันแม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไบอัสเป็น 4.5 โวลต์ (รูปที่ 4.3ข) แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสเริ่มแสดงให้เห็นแม้จะเพียงเล็กน้อยและที่สำคัญการติดตามการทดลองซ้ำยังช่วยให้เห็นการซ้อนทับกันอย่างสมบูรณ์ในช่วงแรงดันไบอัสเริ่มต้น ลักษณะพฤติกรรมแบบนี้บ่งชี้ว่ามีกระบวนการดักจับและกระบวนการสลายการดักจับพาหะประจุโดยที่กระบวนการดักจับพาหะประจุนั้นจะเริ่มปรากฏเมื่อเริ่มทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในช่วงเริ่มต้นการทดลองการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าและต่อมาจะเกิดการสลายการดักจับพาหะประจุอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะทำการทดลองรอบต่อไปจะเริ่มขึ้นตรงกันข้ามกับผลการทดลองลักษณะนี้สำหรับกรณีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงสุดเป็น 5, 5.5, 6.5 และ 7 โวลต์ ตามลำดับ (ดูรูปที่ 4.3 ค-ฉ) ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ และมีเพียงส่วนเดียวของช่วงกระแสเท่านั้นที่จะถูกกู้คืนโดยการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างชิ้นนี้บ่งชี้ว่ามีกลไกการทำงานแบบอื่นเพิ่มเติมโดยถือว่าสิ่งนี้เกิดจากความร้อนอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าซึ่งจากการทดลองนั้นพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสจะเห็นได้ชัดมากที่สุดดูในรูป 4.3ฉ โดยที่การกวาดแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงสุดที่ 7 โวลต์ซึ่ง ณ จุดนี้นั้นจะเป็นจุดที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการบ่งบอกว่ากลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนในโครงข่ายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เกิดการแยกตัวออก ซึ่งผลที่ได้ก็นำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากการทดลองอย่างถาวร

จากการอภิปรายข้างต้นนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมที่มีส่วนเกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นผลกระทบของการดักจับพาหะ ประจุและความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในขณะที่แบบจำลองกลไกการขนส่งอิเล็กตรอนแบบอื่นนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในขณะที่ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีการอธิบายพฤติกรรมของตัวอย่างฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ด้วยความร้อนเพียงเล็กน้อยภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงโดยใช้แบบจำลอง SCLC สำหรับตัวอย่างในมาตราส่วนมิลลิเมตรที่วัดได้ในการกำหนดค่าด้านข้าง [81] และแนวตั้งตามลำดับ [85,86]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูป 4.3ข นั้นได้ทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันโดยการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าของรูป 4.3ก-จ ในรูปของล๊อการิทึมสองครั้งของพารามิเตอร์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J vs E) และพบว่าข้อมูลมีความเหมือนอย่างมากเชิงคุณภาพกับพฤติกรรมมาตรฐานของแบบจำลอง SCLC ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเปลี่ยนแปลงมาจากพฤติกรรมโอห์มมิก ($J \propto V$) ในช่วงแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำเข้าสู่ยาของแบบจำลอง SCLC ($J \propto V^m; m \geq 2$) ในช่วงแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง โดยที่รูป 3ข แสดงให้เห็นการวิเคราะห์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งได้ทำการพล็อต $\ln J$ vs. $\ln V$ ในช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงซึ่งแสดงให้เห็นกลไกการขนส่งอิเล็กตรอนถึงสามชนิดที่แตกต่างกันโดยสังเกตที่ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ m ที่สามารถระบุได้ที่จุดเปลี่ยนที่กำหนด v_T เริ่มแรกเปลี่ยนจาก $m = 1$ เป็น $m = 2$ หมายถึงการเปลี่ยนไปใช้การนำไฟฟ้าแบบไม่มีพาหะประจุ (TF-SCLC) เมื่อถึงจุดนี้สถานะของกักประจุจะถือว่าหายไปอย่างสมบูรณ์หรือมีแนวโน้มบ่งบอกว่ามีอยู่แต่ไม่ได้เป็นตัวหลักของกลไกการขนส่งโดยที่ภายใต้ข้อกำหนดเหล่านี้ ความหนาแน่นกระแสเป็นไปตามกฎของ Mott-Gurney [75]

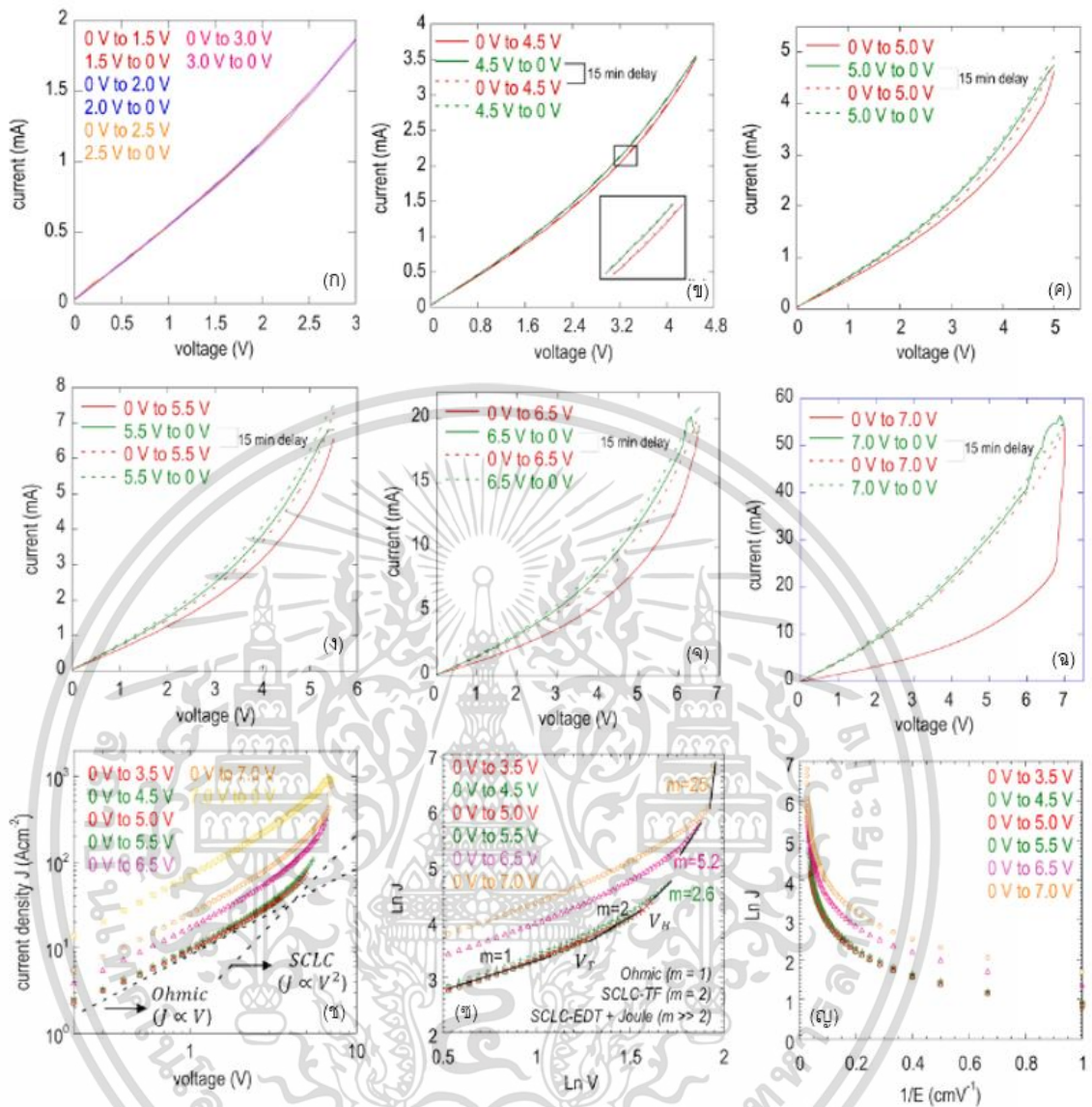
$$J = \frac{9}{8} \epsilon_0 \epsilon_r \mu \frac{E^2}{d} \quad (19)$$

เมื่อ ϵ_0 คือค่าแรงต้านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ, ϵ_r คือแรงต้านสนามไฟฟ้าของตัวกลางที่เป็นไดอิเล็กตริก μ คือค่าความคล่องตัวของประจุไฟฟ้า E คือสนามไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปและ d คือระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ใช้เพิ่มมากขึ้นหลังผ่านจุด v_T แต่อย่างไรก็ตามนั้นมีค่าเลขชี้กำลังที่มากกว่า 2 ซึ่งเกินกว่าจุดเปลี่ยนผันที่สองซึ่งได้ทำการแสดงจุดนี้ว่าเป็นจุด v_H และที่สำคัญค่าของความชัน m จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับแต่ละรอบการทดลอง ตัวอย่างเช่นตามที่แสดงในรูปที่ 4.3ข ค่าความชัน m นั้นเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 2.6 ในการกวาดแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 5.5 โวลต์ และจาก 2 เป็น 5.2 ในการกวาดแรงดันไฟฟ้าครั้งต่อไปที่ 0 ถึง 6.5 โวลต์และในการกวาดครั้งสุดท้าย (0 ถึง 7 โวลต์) จะเห็นว่ามีค่าการเพิ่มขึ้นของความชันอย่างมากโดยมีค่าประมาณ 25 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้ทำให้นึกถึงแบบจำลองกลไกการขนส่งโดยกักพาหะประจุที่กระจายแบบทวีคูณ (EDT-SCLC) และจากการสังเกตพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันนั้น (เข้าใกล้สภาวะระบายความร้อน) ซึ่งอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ว่าเกิดจากการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า (Joule heating) และด้วยเหตุนี้เองกลไกการขนส่งอิเล็กตรอนภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสนั้นอาจเป็นกลไกการขนส่งตามแบบจำลอง EDT-

SCLC [81,86] ที่ให้ความร้อนแบบเดียวกันกับความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า “แบบจำลองการตอบสนองทางความร้อน” ซึ่งพฤติกรรมที่คล้ายกันนี้ได้รับการนำเสนอในบริบทของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบต้านทาน (Resistive Memory Device) [87] และอาจนำไปใช้ต่อในอุปกรณ์ประเภทนี้ได้เช่นกัน

นอกจากนี้จากรูป 4.3 จากการสังเกตเพิ่มเติมว่ามาตรฐานแรงดันไฟฟ้าระหว่างจุด v_T และ v_H ที่เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนจากโอห์มมิกเป็น TF-SCLC และจาก TF-SCLC ไปเป็น EDT+SCLC ที่เพิ่มความร้อนจากกระแสไฟฟ้าเข้าไปด้วยตามลำดับซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงไปสู่ค่าที่สูงขึ้นของความชันในแต่ละรอบของการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปอัสที่ต่อเนื่องกัน ในขณะที่แบบจำลองกลไกการขนส่งอิเล็กตรอนในตัวอย่างไม่ชัดเจน แต่ทว่าแนวโน้มที่สังเกตได้อาจมาจากความจริงที่ว่ากระบวนการให้ความร้อนอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้ามีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัตเชิงปริมาณของสถานะของกักประจุเนื่องจากกรอบโครงสร้างโครงตาข่ายของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้รับการแก้ไขแล้วผ่านการหลอม (Annealing) ซึ่งการตรวจสอบในแง่มุมนี้อาจทำเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น และสิ่งที่สำคัญเป็นลำดับถัดมาสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญภายหลังเกิดการหลอมตัวอย่างอันเนื่องมาจากความร้อนจากกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งแนวโน้มนี้เองที่เป็นตัวบ่งบอกถึงกลไกการขนส่งอิเล็กตรอนในตัวอย่างที่ถูกพัฒนาไปสู่กลไกการขนส่งแบบแถบ (Band-like transport) ตามที่คาดไว้ที่สามารเห็นได้จากวัสดุสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [88]



รูปที่ 4.3 (ก-ฌ) การทดลองวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าเผยให้เห็นพฤติกรรมฮิสเทอริซิสที่รุนแรง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายสูงขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับการทดลองแต่ละครั้งโดยแต่ละครั้งในการทดลองจะมีความล่าช้า 15 นาที (ข) ผลการทดลองของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่นำมาจากรูป (ก-ฌ) ในรูปของ J เทียบกับ V ในสเกลล็อกเพื่อเผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบโอห์มมิกไปเป็นแบบ SCLC (ช) ผลการทดลองจากรูป 4.3ข ในรูปของ $\ln J$ vs. $\ln V$ ในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเพื่อเน้นถึงสามรูปแบบของกลไกการขนส่ง (Ohmic, SCLC-TF และ Joule-heating ที่ปรับปรุงด้วย SCLC-EDT) (ฌ) ผลการทดลองจากรูป 4.3ช ในรูปของ $\ln J$ vs. $\ln 1/E$ เผยให้เห็นว่าไม่มีความเข้ากันที่ชัดเจนสำหรับแบบจำลอง TAT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าจากที่ผ่านมาจะแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองกลไกการขนส่งแบบ SCLC นั้นมีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงในตัวอย่างฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เช่นเดียวกันกับกรณีของการวิเคราะห์แบบจำลองอุโมงค์ FN ที่นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง SCLC นั้นเผยให้เห็นถึงความเหมาะสมในเชิงคุณภาพเท่านั้นและพบว่าการประมาณการในเชิงปริมาณที่สมเหตุสมผลนั้นเป็เนื่องยาก ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้ $\epsilon_r = 3.5$ [81], $d = 0.2$ cm และค่า J จากการทดลองที่แสดงในรูป 4.3x ค่าความคล่องตัวของพาหะประจุสามารถประมาณการณได้โดยการประยุกต์ใช้กฎของ Mott-Gerney (สมการที่ 4) ซึ่งได้ค่าประมาณ 6.6×10^{10} cm²/Vs ที่แรงดันไฟฟ้า V ประมาณ 4.2 โวลต์ (จากการทดลองกวาดแรงดันไฟฟ้าไบอัสตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์) ผลที่ได้นี้สะท้อนให้เห็นถึงค่าสภาพคล่องของพาหะประจุในตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ก่อนได้รับผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าโดยที่ตัวเลขเหล่านี้มีค่ามากกว่าค่าที่ควรจะเป็นอย่างสมเหตุสมผลมากหลายเท่าทำให้ไม่สามารถนำมาใช้งานได้และนอกเหนือจากนี้ยังไม่สามารถศึกษาพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงได้เนื่องจากพฤติกรรมที่ซับซ้อนของพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากกระบวนการดักจับพาหะประจุและการให้ความร้อนและข้อเท็จจริงอีกข้อที่ว่าสนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่เพียงพอจำเป็นต่อการทดลองไม่สามารถทำได้โดยหลีกเลี่ยงการเกิดกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้ไม่สามารถประมาณค่าในเชิงปริมาณสำหรับค่าความหนาแน่นของกักประจุได้เช่นเดียวกันกับบทความวิจัยที่ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ [81,86]

นอกเหนือจากแบบจำลอง SCLC แบบมาตรฐานแล้วแบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุที่น่าสังเกตอีกชนิดหนึ่งที่คำนึงถึงคือ แบบจำลอง TAT (Trap-assisted tunneling) [64] อย่างไรก็ตามพบว่าข้อมูลจากการทดลองนั้นไม่สอดคล้องกับกระบวนการนี้ (ดูรูปที่ 4.3b) และตารางที่ 1 ให้ข้อมูลสรุปสั้นๆ สำหรับผลลัพธ์ที่เหมาะสมของแบบจำลองการขนส่งทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้และเป็นที่ชัดเจนว่ายังไม่มีการพัฒนาที่ชัดเจนสำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งต้องกล่าวว่าการบังคับใช้โดยทั่วไปของแบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุภายใต้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงที่กล่าวมาจนถึงขณะนี้จำเป็นต้องได้รับการศึกษาอย่างระมัดระวังเป็นอย่างมากและที่สำคัญนั้นจากความจริงที่ว่ากลไกการขนส่งของแบบจำลองอื่นๆ เช่น แบบจำลอง Schottky และ Poole-Frenkel ที่แสดงในรูป 4.2c นั้นแสดงความเป็นเส้นตรงที่ดีในช่วงแรงดันไฟฟ้าไบอัสบางช่วงซึ่งอาจชี้ให้เห็นว่ากระบวนการเหล่านี้ก็ไม่สมควรถูกตัดออกจากการพิจารณาอย่างสิ้นเชิงและ

นอกจากนี้แบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุอื่นๆ ที่รวมถึงผลกระทบของอุณหภูมินั้น [80] ก็สมควรนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลของความเหมาะสมของข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณสำหรับแบบจำลองที่ใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงที่ใช้ในงานนี้

Fitting Models	Qualitative	Quantitative
Schottky	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poole-Frenkel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FN Tunneling	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SCLC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.3 การทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงหลายรอบการทดลองเพื่อปรับปรุงการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ขอบเขตของการปรับปรุงซึ่งการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีที่มาจากความร้อนที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างซึ่งสามารถควบคุมได้ในการทดลองผ่านการควบคุมรูปแบบการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสในตัวอย่างเป็นรอบๆ ซึ่งในกาทดลองนี้ได้มีวิธีสำหรับเปรียบเทียบในการทดลอง 2 วิธีด้วยกันโดยในแนวทางแรกนั้นแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) ของแต่ละรอบการทดลองจะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ (ดูในรูป 4.4ก) ในขณะที่แนวทางที่สองนั้นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะค่อยๆ ถูกปรับให้มีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบการทดลอง (รูปที่ 4.4ง) ซึ่งในรูปที่ 4.4ข และ 4.4จ นั้นได้แสดงผลลัพธ์สำหรับการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงตามแนวทางดังกล่าวตามลำดับสำหรับตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง พร้อมกับแสดงผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับแบบจำลอง SCLC ในรูป 4.4ค และ 4.4ฉ ตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองทั้ง 2 รูปแบบนั้นแสดงพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสทั่วไปสำหรับแต่ละรอบการทดลองวัดผลและสืบเนื่องจากผลที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ส่งผลให้มีการปรับปรุงการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอย่างเป็นระบบแต่จะสังเกตเห็นได้ว่าการทดลองรูปแบบที่ 2 นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงสำหรับการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและนอกเหนือจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าสำหรับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

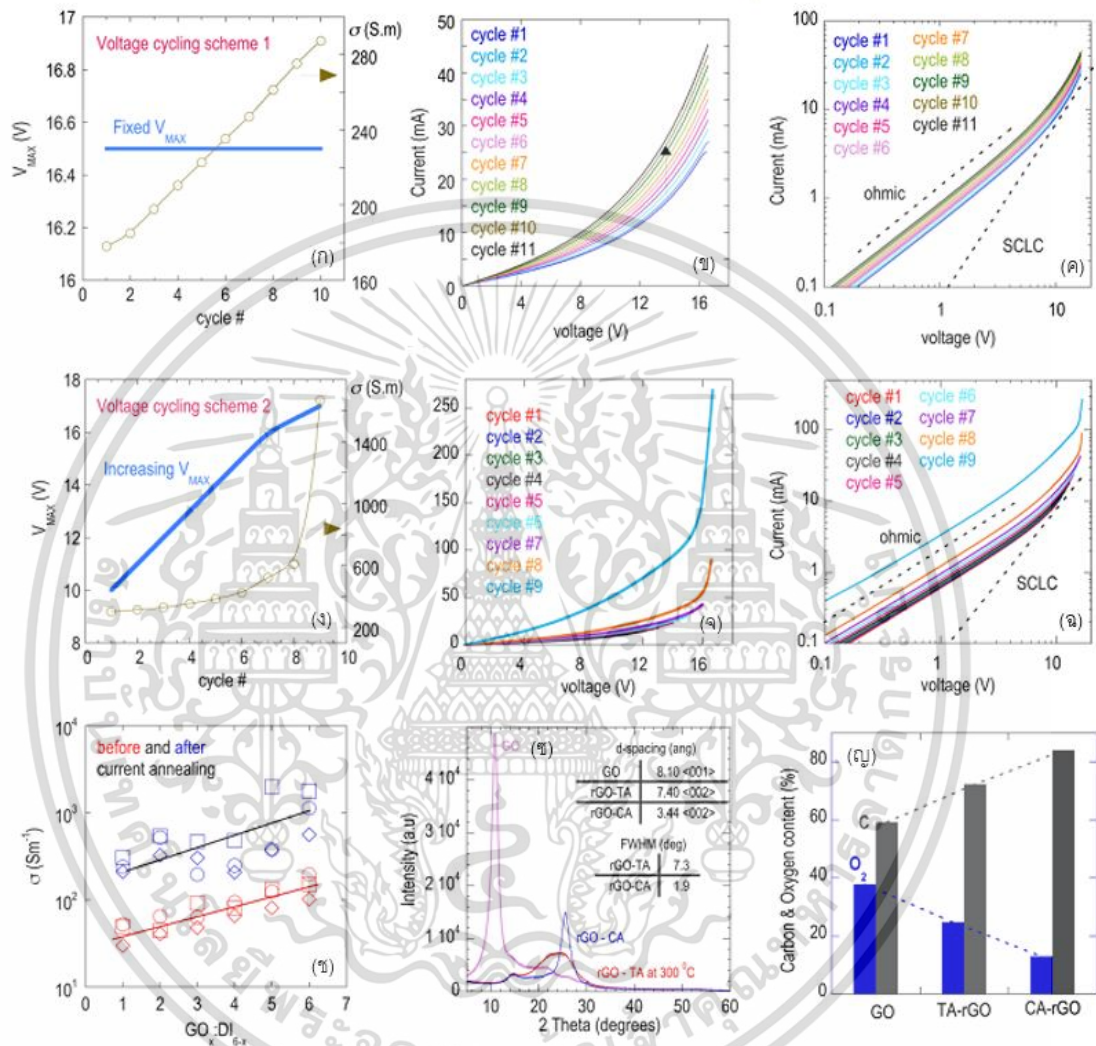
แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำดังที่แสดงในรูป 4.4ก และ 4.4ข ตามลำดับและสำหรับตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.4ข ช่วงการกวาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับแต่ละรอบของการทดลองค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าคงที่ (16.5 โวลต์) ซึ่งแสดงให้เห็นผลมาจากพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสและการปรับปรุงการนำไฟฟ้าของตัวอย่างซึ่งค่อยๆเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆแต่สามารถควบคุมได้ แต่ในทางกลับกันนั้นสำหรับตัวอย่างที่แสดงในรูป 4จ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการทดลองจะถูกรับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละรอบการทดลอง (ตั้งแต่ 10 จนถึง 17 โวลต์) ซึ่งบังคับให้ผลกระทบของความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้านั้นมีความรุนแรงมากขึ้น ยกตัวอย่างในการทดลองเช่น กระแสไฟฟ้าจากการทดลองสูงสุดสำหรับการวัดรอบแรกมีค่าเท่ากับ 11 มิลลิแอมป์ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 10 โวลต์และเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 270 มิลลิแอมป์ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 17 โวลต์ในการทดลองวัดรอบสุดท้ายจากผลการทดลองข้างต้นนั้นถือว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอย่างมาก

แม้ว่าจะเห็นได้ชัดว่ารูปแบบการทดลองแบบแรกนั้นเป็นวิธีที่สะดวกกว่าในการปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แต่ทว่าจริงๆแล้วสามารถปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าในตัวอย่างได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่ในทางกลับกันการทดลองโดยใช้รูปแบบที่สองนั้นช่วยให้การปรับปรุงตัวอย่างนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วกว่าแต่มีความเสี่ยงที่จะสูญเสียตัวอย่างเนื่องจากผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่มากและรวดเร็วเกินไป (จะกล่าวถึงส่วนนี้ในหัวข้อถัดไป) ซึ่งในรูป 4.4ข แสดงข้อมูลสรุปผลของการปรับปรุงคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าจากการทดลองวัดแบบสองขั้ว (ก่อนการแยกตัวอย่าง) สำหรับชุดการทดลองรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันและเนื่องจากผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นนี้จะเห็นว่าประสิทธิภาพของการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้านั้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอย่างมากในตัวอย่างเกือบทั้งหมดเสริมด้วยข้อมูลจากการวิเคราะห์ XRD และ EDX (ดูในรูป 4ซ และ 4ญ) ที่เปรียบเทียบตัวอย่างฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ก่อนและหลังการได้รับความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าซึ่งบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่แข็งแกร่งของโครงข่ายรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ภายหลังจากการปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยผลกระทบความการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เห็นได้ชัดที่เกิดขึ้นของจุดสูงสุดของกราฟที่รูปทรง <002> ในการวิเคราะห์ XRD (FWHM ที่ 1.9 องศา เทียบกับ 7.3 องศาสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ก่อนการได้รับผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า) ที่ 2-เซต่าเท่ากับ 25.8 องศาซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกราฟท์บริสุทธิ์เป็นอย่างมาก (26.5 องศา) และค่าช่องว่าง d (d -spacing) มีค่าลดลงจาก 8.10 อังสตรอมสำหรับฟิล์มรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ไม่ผ่านการทดลองเหลือเพียง 7.40 อังสตรอมสำหรับฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยความร้อนเพียงเล็กน้อยและลดลงอย่างมากเหลือเพียง 3.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อังสตรอมสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าและจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบ (รูปที่ 4ก) เผยให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนธาตุคาร์บอน (70-82%) และการลดลงของธาตุออกซิเจนในอัตราส่วนที่สอดคล้องกัน



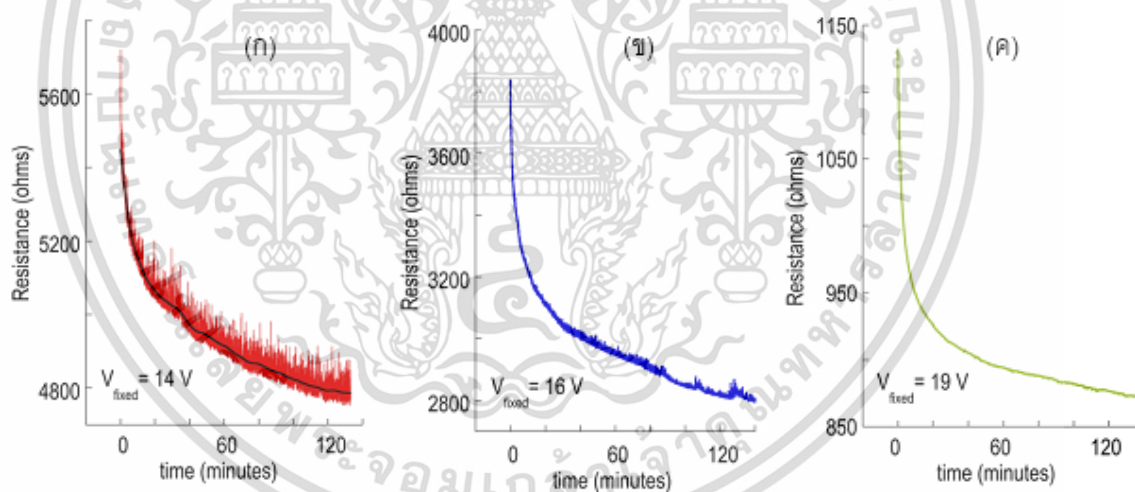
รูปที่ 4.4 การให้ความร้อนแบบจูล (การหลอมด้วยกระแส) ทำให้เกิดการปรับปรุงการนำไฟฟ้าอย่างเป็นระบบซึ่งได้จากตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยใช้รูปแบบการหมุนเวียนของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

4.4 การทดลองวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยขึ้นกับเวลาภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง

กระบวนการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างอาจทำได้โดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าไบอัสคงที่ที่ค่ากลางๆ ไม่สูงหรือต่ำเกินไปและปล่อยให้

ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าทำการหลอมตัวอย่างเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น จากรูป 4.5ก-ค แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะหนึ่งของความต้านทานในตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งจะเห็นว่าจากข้อมูลทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันอย่างชัดเจนโดยที่ความต้านทานนั้นมีค่าลดลงอย่างมีลักษณะเฉพาะโดยกระบวนการที่เริ่มต้นนั้นความต้านทานจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2-3 นาทีแรกตามด้วยความต้านทานที่ค่อยๆลดลงด้วยความเร็วที่ช้าลงซึ่งกินระยะเวลานานหลายชั่วโมง แม้ว่าจะยังไม่ชัดเจนว่ามาตราส่วนเวลาเหล่านั้นนั้นเกี่ยวข้องกับ การดักจับพาหะประจุหรือความร้อน เนื่องจากกระแสไฟฟ้าหรือทั้งสองอย่างซึ่งเราเชื่อว่ากระบวนการที่รวดเร็วในช่วงแรกนั้นเกี่ยวข้องกับการแยกตัวของฟังก์ชันออกซิเจนที่เกิดจากการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระบวนการที่ช้าภายหลังซึ่งเกิดจากการรวมกันของกระบวนการให้ความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระบวนการดักจับและขจัดพาหะประจุซึ่งความจริงที่ว่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างในสภาวะคงตัวไม่สามารถทำได้แม้หลังจากผ่านไปหลายชั่วโมงก็ตามนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องอันเป็นผลมาจากกระบวนการที่มีความแข็งแรงภายใต้กระบวนการของสนามไฟฟ้าไบอัสสูง



รูปที่ 4.5 (ก-ค) การเกิดวิวัฒนาการชั่วขณะหนึ่งของความต้านทานในตัวอย่างที่ได้จากการทดลองการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบุไว้หลายค่าแบบคงที่

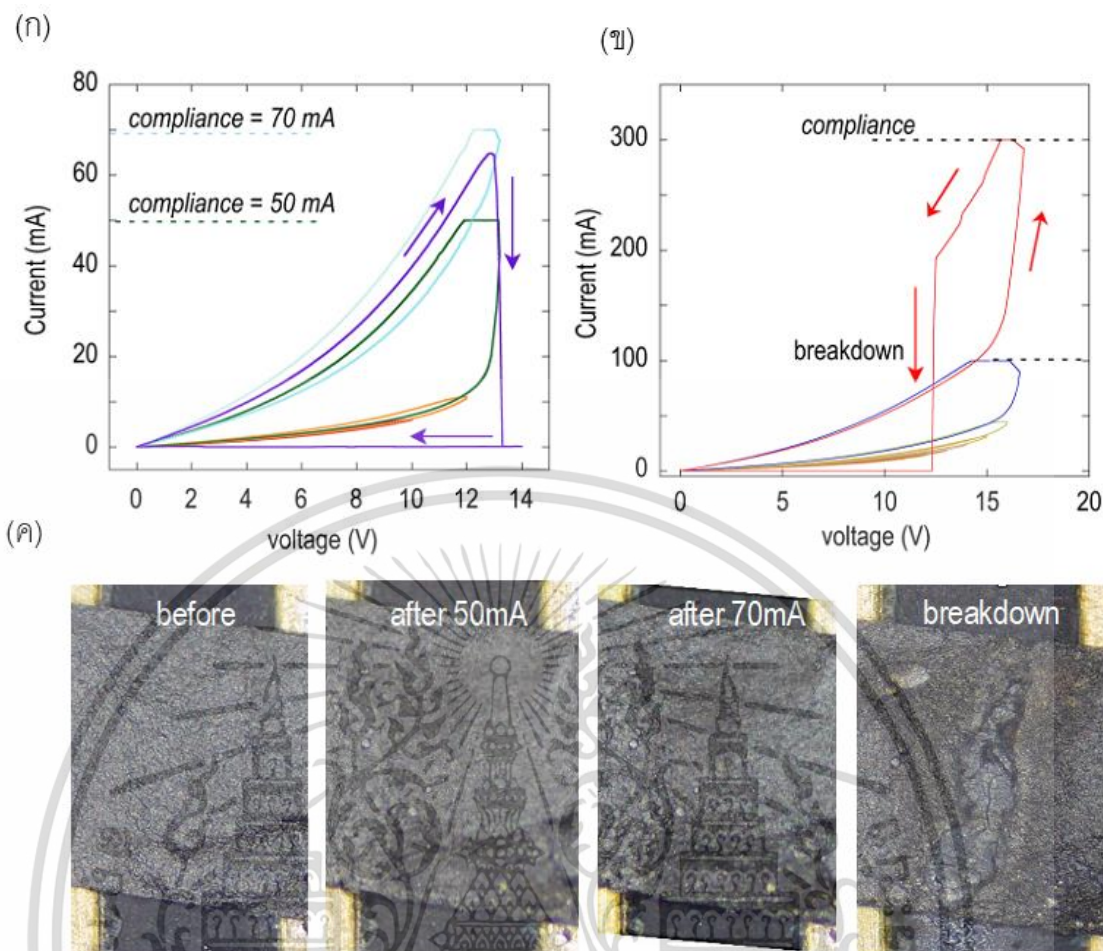
4.5 พฤติกรรมการพังทลายทางไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะพูดถึงพฤติกรรมการพังทลายของตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพบว่าการพังทลายของตัวอย่างนั้นสามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้าจากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าซ้ำๆ หลายๆ รอบเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างทว่านอกเหนือจากขั้นตอนนี้ การ

ไหลของกระแสไฟฟ้าซ้ำหลายๆครั้งจะทำให้เกิดของตัวอย่างและทำให้ตัวอย่างเกิดการพังทลายใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะโดยใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท้ายที่สุด โดยเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการพังทลายได้ละเอียดยิ่งขึ้นจึงได้คิดวิธีสำหรับการทดลองโดยการจำกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้ไหลผ่านในตัวอย่างโดยการตั้งค่าขีดจำกัดไว้ล่วงหน้าในเครื่องมือวัดโดยผลลัพธ์ของการทดลองโดยใช้วิธีนี้นั้นข้อมูลที่ได้รับสำหรับการทดลองในตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 4.6ก และ 4.6ข โดยเน้นที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างที่เกิดการพังทลายของตัวอย่างรีดิวซ์กราไฟท์ออกไซด์ ซึ่งแม้ว่าจะเป็นเรื่องปกติที่จะเกิดการพังทลายในตัวอย่างเนื่องจากการลดลงอย่างกะทันหันของกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างในทิศทางของการกวาดแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้า (สังเกตได้ในรูป 4.6ก) แต่ในบางตัวอย่างนั้นการพังทลายยังคงเกิดขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไปอัสนั้นถูกกวาดไปในทิศทางย้อนกลับ รูปที่ 4.6ข ที่แสดงข้อมูลของตัวอย่างในกรณีนี้ซึ่งจากการสังเกตนั้นสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการพังทลายที่ “ล่าช้า” เนื่องจากการแพร่กระจายของรอยแตกที่เป็นจุดเริ่มต้นของตัวอย่างหรืออีกอย่างคือความเสียหายจากความร้อนอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวอย่าง

ในรูปที่ 4.6c แสดงภาพของพื้นผิวตัวอย่างที่ระยะต่างๆ ของการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปอัสที่แสดงในรูป 4.6ก แม้ว่าการเปลี่ยนสีของตัวอย่างจะเห็นได้ชัดเจนจากภาพเนื่องจากผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า แต่ภาพหลังจากการพังทลายของอุปกรณ์เผยให้เห็นร่องรอยความเสียหายของอุปกรณ์อย่างรุนแรงซึ่งคล้ายกันกับผลกระทบของการระบายความร้อนจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [89] ว่ารีดิวซ์กราไฟท์ออกไซด์จะมีลักษณะเปราะในธรรมชาติและมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งเป็นผลจากการแยกตัวทางความร้อนของกลุ่มฟังก์ชันซึ่งการพังทลายของตัวอย่างก่อนเวลานั้นอาจเป็นผลกระทบที่ได้จากเหตุผลดังกล่าว



รูปที่ 4.6 การศึกษาการพังทลายของอุปกรณ์โดยการทดลองค่อย ๆ เพิ่มค่าจำกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดของการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแต่ละครั้งซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพังทลายทางไฟฟ้าของตัวอย่างอย่างกะทันหันในอุปกรณ์ 2 ชิ้นซึ่ง (ก) การจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้า (ข) การจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปข้างหลัง (ค) ภาพถ่ายในขั้นตอนต่าง ๆ ที่นำไปสู่การพังทลายขั้นสุดท้ายสำหรับตัวอย่างในรูป (ก)

4.6 กลไกการขนส่งพาหะประจุที่แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำและผลกระทบของการลอมด้วยกระแสไฟฟ้า

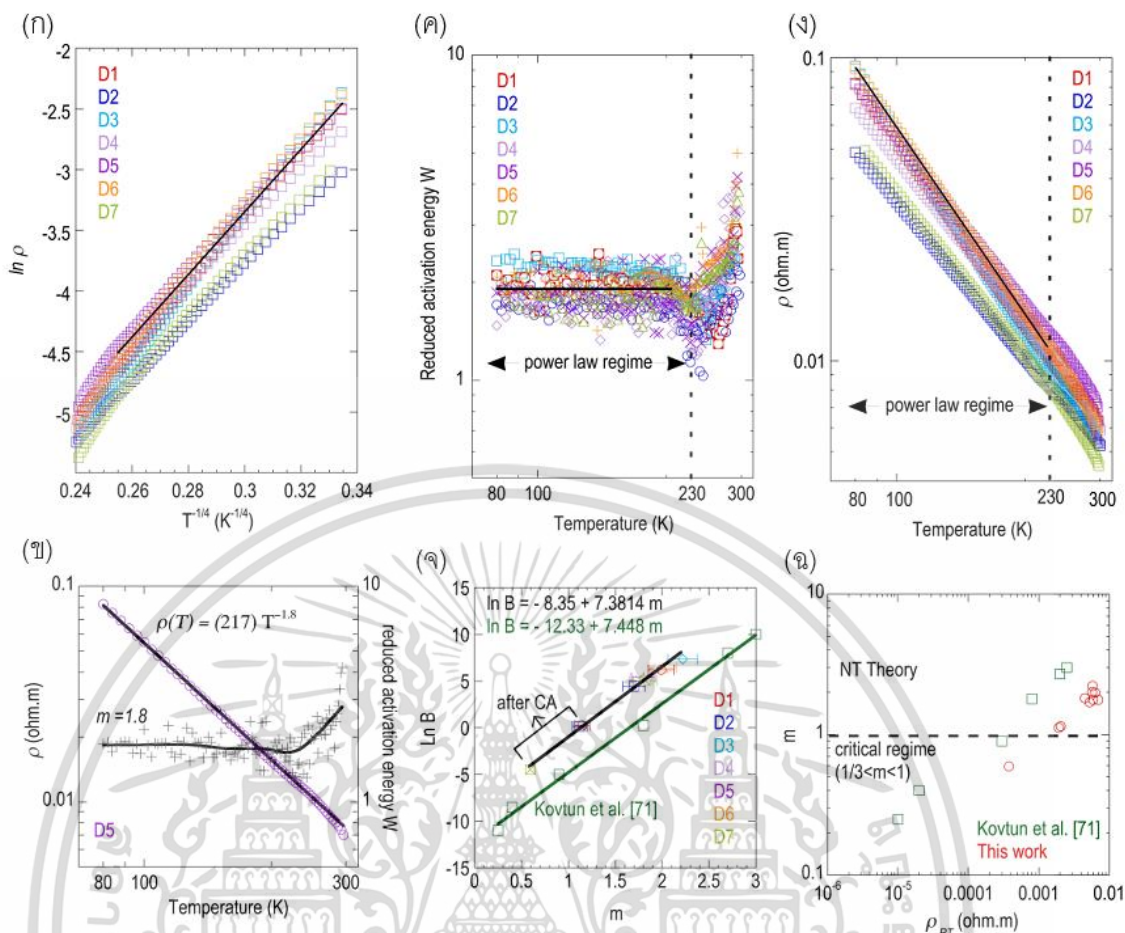
พฤติกรรมการขนส่งพาหะประจุที่ไฟฟ้าแรงดันต่ำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้รับการตรวจสอบและค้นคว้าอย่างกว้างขวาง [90-94] ที่เสนอแบบจำลอง VRH แบบต่างๆ เพื่ออธิบายสภาพต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยสมการพื้นฐานของแบบจำลอง VRH อาจเขียนได้เป็น [95-97]

$$\rho(T) = \rho_{0,VRH} \exp\left[\frac{T_0}{T}\right]^\beta \quad (20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\rho_{0,VRH}$ คือ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, T_0 คืออุณหภูมิเฉพาะสำหรับพฤติกรรมกระโดดของพาหะประจุที่เกี่ยวข้องกับความยาวของการโคคลิลเซชันและ β คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ใช้อธิบายรูปแบบต่างๆของแบบจำลอง VRH เมื่อ $\beta = 1/2$ กลไกการขนส่งพาหะประจุของแบบจำลองจะถูกอธิบายว่าเป็น 1D-Mott VRH หรือ Efros-Scklovsky VRH และเมื่อเบต้าเท่ากับ $\beta = 1/3$ และ $\beta = 1/4$ จะสอดคล้องกับ 2D- และ 3D-Mott-VRH ตามลำดับ

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [85,97] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่ใช้สมการอย่างง่ายนั้นอาจนำไปสู่ข้อผิดพลาดที่เป็นระบบและท้ายที่สุดก็จะนำไปสู่การตีความกลไกการขนส่งพาหะประจุผิดพลาดไปในที่สุดแต่ทว่าอย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการพิจารณาจากพลังงานการกระตุ้นที่ลดลงที่เป็นอนุพันธ์ล็อกการิทึมระหว่าง $\rho(T)$ และ T ($W(T) = -d(\ln \rho)/d(\ln T)$) ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วการแปลงเลขยกกำลังเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นนั้นจะทำให้การวิเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยที่มีตัวอย่างโดยตรงของความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จากข้อมูลการทดลองที่ได้จากการวัดความต้านทานแบบ 4 ขั้วของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 600 เคลวินที่ทำการศึกษาในงานนี้ โดยเทียบกับ $\ln \rho(T)$ กับ $T^{-1/4}$ กราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.7k สำหรับอุปกรณ์ที่นำมาทดลองที่แตกต่างกัน 7 ชนิด (D1-D7) ที่แสดงความเป็นเส้นตรงที่สมเหตุสมผลในช่วงอุณหภูมิในช่วงระยะกว้างที่สุดเหมือนว่ามีพฤติกรรมตามแบบจำลอง 3D-Mott VRH และอาจเป็นกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะประจุที่ควบคุมพฤติกรรมของตัวอย่างอยู่ แต่อย่างไรก็ตามนั้นการวิเคราะห์ในรายละเอียดเพิ่มเติมของพลังงานการกระตุ้นที่ลดลงที่แสดงในรูป 4.7ข นั้นเผยให้เห็นถึงลักษณะที่ต่างไปตากเดิมอย่างสิ้นเชิงที่ว่าหากกลไกการขนส่งของพาหะประจุนั้นถูกควบคุมด้วยพฤติกรรมตามแบบจำลอง 3D-Mott VRH แนวโน้มเชิงเส้นที่มีที่มาจากความชัน ที่ $\beta = 1/4$ จะถูกเพ่งเล็งเนื่องจากความสัมพันธ์ $\ln W(T) = -\beta \ln T + \ln \beta T_0^\beta$ [97] แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองนั้นพบว่ามีการทดลองสองแบบที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิโดยมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ 80 จนถึง 230 เคลวินและตามด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานกระตุ้นหลังจากอุณหภูมิ 230 เคลวิน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการทดลองกลไกการขนส่งพาหะประจุของตัวอย่างภายใต้แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ในงานวิจัยล่าสุดของ Kovtun และคณะ [97] ได้ศึกษารายละเอียดกลไกการขนส่งพาหะประจุระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ชั้นเดียวและโครงข่ายของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จากงานวิจัยนี้พบว่า ES-VRH เป็นกลไกการขนส่งที่สำคัญสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ชั้นเดียวในขณะที่การเปลี่ยนแปลงไปสู่พฤติกรรมกฎกำลัง (Power law) ที่ช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่หนากว่าซึ่งสรุปว่าการขนส่งพาหะประจุในฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ถูกกำหนดโดยขนาดของกลุ่ม sp^2 และระดับของการซ้อนทับกันของแต่ละชั้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และเป็นที่ยอมรับกันดีอยู่แล้วว่าแนวโน้มคงที่ที่สังเกตได้ว่าพลังงานการกระตุ้นที่ลดลงนั้นสอดคล้องกับพฤติกรรมกฎกำลังซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถสังเกตได้จากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงในระบบนี้ภายใต้กฎกำลังค่าความต้านทานไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยสมการความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho(T) = \rho_{0,PL} \exp \left[\frac{T}{T_1} \right]^{-m} \quad (21)$$

เมื่อ $\rho_{0,PL}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ, T_1 คืออุณหภูมิเฉพาะของกฎกำลังและ m คือค่าชี้กำลังเฉพาะ ในกรณีนี้ความสอดคล้องของค่าพลังงานการกระตุ้นที่ลดลงนั้นอาจเขียนได้เป็น $\ln W(T) = \ln(m)$

รูปที่ 4.7ค เผยให้เห็นถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานและอุณหภูมิของตัวอย่าง D1-D7 ที่พล็อตในระดับลอการิทึมโดยที่มีการแสดงความเป็นเส้นตรงที่ชัดเจนในช่วง 80 ถึง 230 เคลวินซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้สำหรับพฤติกรรมกฎกำลังแต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 230 เคลวินเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นอย่างชัดเจนจากพฤติกรรมของกฎกำลังและแสดงความสัมพันธ์กับการกลับตัวโดยตรงจากข้อมูล ซึ่งจากงานวิจัยของ Kovtun และคณะนั้นสังเกตเห็นผลการทดลองที่คล้ายกันในเส้นแนวโน้มนำขึ้น [97] ในสภาวะอุณหภูมิสูงสำหรับฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีความหนามากกว่า 6 นาโนเมตรซึ่งสิ่งนี้นั้นสอดคล้องกับการทดลองนี้แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองนั้นไม่ได้รายงานถึงความเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมกฎกำลังและเชื่อว่าจากการกลับตัวของ $W(T)$ เป็นสัญญาณบ่งบอกว่ามีการเกิดขึ้นของกลไกการขนส่งพาหะประจุเพิ่มเติมที่จำเป็นจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจอย่างถ่องแท้โดยในงานวิจัยของ Kovtun และคณะ [97] รายงานว่าแนวโน้มนำในเชิงบวกของพลังงานการกระตุ้นอาจสะท้อนถึงความจริงที่ว่าฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์อาจมีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบเสมือน (Quasiconducting) ในธรรมชาติมากกว่าสารกึ่งตัวนำทั่วไป (Semiconducting)

จากการเน้นเฉพาะย่านที่แสดงผลของพฤติกรรมกฎกำลังทำให้อาจได้รับข้อมูลเพิ่มเติมว่าความต้านทานในย่านนี้ถูกอธิบายโดยรูปแบบทั่วไป $\rho(T) = BT^{-m}$ เมื่อ B คือตัวคูณมาตราส่วนโดยใช้ความสัมพันธ์ซึ่งสามารถแสดงความสมบูรณ์ของการซ้อนทับกันของกราฟระหว่างการทดลองและทฤษฎีได้ช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 230 เคลวิน (สามารถดูการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างการทดลอง D5 ในรูปที่ 4.7ง โดยใช้กราฟแสดงความสัมพันธ์นอกจากนี้ความเบี่ยงเบนของผลการทดลองที่ออกจากพฤติกรรมกฎกำลังในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 230 เคลวินนั้นสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในรูป 4.7ง โดยตารางที่ 2 แสดงข้อมูลสรุปของพารามิเตอร์ที่แยกออกมาสำหรับตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ความแตกต่างเล็กน้อยสำหรับความต้านทานของแต่ละตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องนั้นอาจเกี่ยวข้องกับความผันแปรของความหนาของตัวอย่างหรือการเรียงตัวกันแบบสุ่มจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และเพื่อเป็นการพิสูจน์วิธีวิเคราะห์พลังงานการกระตุ้นที่

สอดคล้องกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln B$ และ m (สามารถดูได้ในรูป 7จ) ที่เผยให้เห็นถึงข้อมูลทั้งหมดของกราฟเส้นตรง โดยจากอุณหภูมิเฉพาะของพฤติกรรมกฎกำลัง T_1 และค่าสัมประสิทธิ์ ρ_0 และ $\rho_{0,PL}$ อาจถูกนำออกจากการพล็อตนี้เพื่อปรับให้เข้ากับรูปแบบการทำงานทั่วไปของสมการ [97]

$$\ln B = \ln \rho_{0,PL} + m \ln T_1 \quad (22)$$

ดังที่แสดงให้เห็นในรูป 7จ ความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์เผยให้เห็นถึงความคล้ายกันอย่างมากกับข้อมูลที่ได้ในงานวิจัยของ Kovtun และคณะ [97] ซึ่งชี้ให้เห็นถึงพฤติกรรมโดยทั่วไปที่เป็นไปได้สำหรับฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยจากสมการที่ 7 สามารถนำมาคำนวณตัวอย่างในการทดลองซึ่ง $T_1 = 1606 \text{ K}$, $\rho_{0,PL} = 2.36 \times 10^{-4}$ โอห์มเมตร

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปตัวอย่างในการทดลองและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองกฎกำลังสำหรับการศึกษาค่าสภาพต้านทานแบบ 4 ขั้วที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

Device	$\rho_{RT}(\text{ohm. m})$	W (mm)	L (mm)	Median m value (80 -200 K range)	Power law factor, B	scale
D1	0.0063081	3	2	1.99	498.16	
D1_after CA	0.0019287	3	2	1.12	1.1774	
D2	0.0052599	6	2	1.7	83.536	
D2_after CA	0.0020461	6	2	1.148	1.3491	
D3	0.0058359	3	2	2.22	1559.7	
D4	0.0059136	3	2	1.77	159.95	
D5	0.0070215	3	2	1.8	217.00	
D6	0.0057604	4	2	2.01	613.24	
D7	0.0045036	4	2	1.82	158.00	
D7_after CA	0.00037720	4	2	0.594	0.011364	

จากการศึกษาอย่างละเอียดในงานวิจัยของ Kovtun และคณะ [97] ได้มีการตั้งข้อสังเกตว่าการกลไกการขนส่งพาหะประจุในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แสดงความคล้ายคลึงอย่างมากกับกลไกการขนส่งพาหะประจุในฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตที่ค่าความชันจากพฤติกรรมกฎกำลังที่สังเกตได้นั้นอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ในย่านวิกฤติ (Crisis regime) และแบบจำลองอุโมงค์นิวเคลียร์ (Nuclear Tunneling) สำหรับพอลิเมอร์โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูป 4.7จ เผยให้เห็นถึงค่าสภาพต้านทานของตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิห้อง ($\rho_{0,RT}$) สอดคล้องกันกับค่าความชันซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

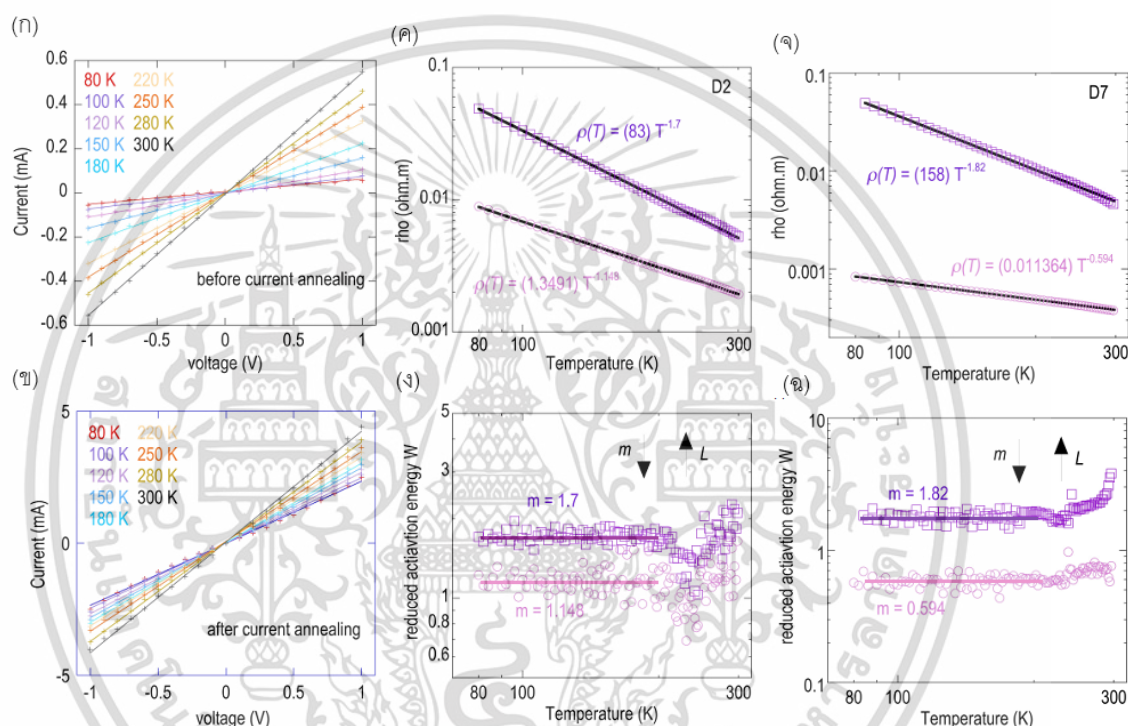
ในช่วงที่ระบุโดยแบบจำลองอิมโง์นิกิวเคลียร์ สำหรับค่าความต้านทานที่ต่ำกว่านั้นที่ได้จากการลอมตัวอย่างด้วยกระแสไฟฟ้านั้น ค่าความชันจะลดลงต่ำกว่า 1 ซึ่งบ่งชี้ว่าพฤติกรรมของกฎกำลังจะคล้ายคลึงกับแบบจำลองย่านวิกฤติ

แม้ว่าจะไม่ได้ทำการทดลองอย่างละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานและอุณหภูมิ การวิเคราะห์โดยใช้ฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่มีความต้านทานต่างกัน (โดยการปรับพารามิเตอร์การประมวลผลการทดลอง) การทดลองการลอมด้วยกระแสไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงอาจเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวอย่าง จากที่แสดงในรูป 4.8ก และ 4.8ข ตามลำดับกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในความสัมพันธ์กับอุณหภูมิก่อนและหลังจากการลอมด้วยกระแสไฟฟ้า โดยในช่วงแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ในช่วง ± 1 โวลต์จะสังเกตเห็นความเป็นพฤติกรรมโอห์มิกที่ดีในขณะที่รูป 4.8ค แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานจากการทดลองวัดแบบ 4 ขั้วเทียบกับอุณหภูมิจากตัวอย่าง D2 เส้นตรงจากกราฟแสดงความสัมพันธ์นั้นเข้ากันกับพฤติกรรมกฎกำลังที่ได้จากการคำนวณโดยความชันจากการวิเคราะห์ผลงานการกระตุ้นที่แสดงในรูป 4.8ง และสำหรับรูป 4.8จ และ 4.8ฉ แสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันสำหรับตัวอย่าง D7 ซึ่งแสดงความเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่ามากและที่น่าสนใจคือค่าความชันที่ได้รับหลังจากการลอมด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างทั้งสาม (D1, D2 และ D7) นั้นเหมาะสมอย่างยิ่งกับเส้นตรงที่อธิบายกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ $\rho(R, T)$ จากรูป 4.7ฉ ซึ่งยืนยันพฤติกรรมกฎกำลังที่กำหนดกลไกการขนส่งพาหะประจุทั้งหมดในวัสดุ

เป็นที่น่าสังเกตว่าเนื่องจากการทดลองนั้นมีช่วงอุณหภูมิที่จำกัดจึงไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้สำหรับกลไกการขนส่งพาหะประจุของแบบจำลอง VRH ตามงานวิจัยของ Kovtun และคณะ [97] ซึ่งหมายความว่าสำหรับพารามิเตอร์ความยาวการโคคัลไลเซชันไม่สามารถคำนวณเป็นตัวเลขได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการอ้างอิงในงานวิจัยก่อนหน้าการทดลองหาค่าความยาวการโคคัลไลเซชันเป็นไปตามความสัมพันธ์ $L \propto 1/m^2$ สำหรับสารกึ่งตัวนำ 1 มิติที่มีสารเจืออยู่สูง [98] ในส่วนของการลดลงของค่าความชัน m สำหรับการลอมตัวอย่างด้วยกระแสไฟฟ้าจึงควรหมายถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความยาวโคคัลไลเซชัน L ดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 4.8ฉ ที่ค่าความชันของตัวอย่าง D7 ลดลงเหลือเพียง 3.25 หลังการลอมด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งประมาณการณ์ว่าค่าความยาวโคคัลไลเซชันจะเพิ่มขึ้นหลังจากการทดลอง โดยการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญของค่าความยาวโคคัลไลเซชันสามารถนำมาให้เหตุผลประกอบสำหรับการลดลงอย่างมากของบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบ (และส่งผลให้เกิดกลไกการขนส่งพาหะประจุที่ดีขึ้น) ที่เกิดจากการกำจัดกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนที่

ขับเคลื่อนพลังงานความร้อนที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และยังเชื่ออีกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่เผยแพร่หรือใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นอีกของค่าความยาวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถเป็นไปได้ตั้งแต่ค่าการนำไฟฟ้าในการทดลองมีค่าเท่ากับ 3×10^5 S/m และมีค่ามากกว่านั้นในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [99,100] สำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้รับผลกระทบของความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า โดยในการทดลองครั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการทดลองมีค่าเท่ากับ 25651 S/m (ตัวอย่าง D7 หลังจากการหลอมด้วยกระแสไฟฟ้า) แต่ทว่าการเพิ่มความยาวการนำไฟฟ้าเพิ่มเติมนั้นถูกจำกัดเนื่องจากการพังทลายของตัวอย่างก่อนกำหนด



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำที่ได้ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 80 ถึง 300 เคลวินสำหรับตัวอย่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แบบก่อน (ก) และหลัง (ข) การหลอมด้วยกระแสไฟฟ้า (ค-ฉ) การวิเคราะห์ผลการทดลองจากรูป 4.8ก และ ข ตามลำดับตามแบบจำลองกฎกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โดยสรุปนั้นได้ทำการศึกษาและทดลองอย่างครอบคลุมเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมจากความสัมพันธ์คุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง, การพังทลายและคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อยู่ได้เองอย่างอิสระที่ถูกรีดิวซ์เพียงเล็กน้อยในขนาดมิลลิเมตรและความหนาในระดับไมโครเมตรในขณะที่พฤติกรรมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงนั้นชวนให้นึกถึงแบบจำลองกลไกการขนส่งพาหะประจุแบบอุโมงค์ FN และ SCLC ซึ่งพบว่าแบบจำลองเหล่านี้ไม่เพียงพอสำหรับข้อมูลในเชิงปริมาณที่พอเหมาะในการวิเคราะห์เพื่ออธิบายพฤติกรรมขนส่งพาหะประจุในตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม โดยทั่วไปแล้วนั้นพบว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองกลไกการขนส่งแบบดั้งเดิมนั้นมีความซับซ้อนซึ่งผลกระทบที่ได้รับจากแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูงคือการดักจับพาหะประจุและความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้า อีกทั้งยังมีพฤติกรรมฮิสเทอรีซิสที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้ายังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอย่างถาวรในตัวอย่างที่เราเห็นได้ชัดในการทดลองที่ทำซ้ำหลายครั้งและที่สำคัญยังพบอีกว่าวิธีการหลอมตัวอย่างด้วยกระแสไฟฟ้านั้นช่วยให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้อย่างเป็นระบบโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสด้วยค่าคงที่และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าโดยขึ้นอยู่กับเวลาพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นลดลงในช่วงเวลาสองช่วงที่แตกต่างกันโดยเริ่มจากกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับวินาทีและตามมาด้วยกระบวนการที่สองที่ช้ากว่าและใช้เวลานานหลายชั่วโมง อีกทั้งยังมีการสังเกตพฤติกรรมพังทลายทางไฟฟ้าในตัวอย่างเมื่อถึงขีดจำกัดของกระแสในกระบวนการหลอมด้วยกระแสไฟฟ้าพบว่าพฤติกรรมการพังทลายทางไฟฟ้าของตัวอย่างคล้ายกันกับผลกระทบที่คล้ายกับผลกระทบการหนีจากความร้อน (Thermal-runaway effect) ซึ่งสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อตัวอย่างฟิล์มบางรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สุดท้ายยังได้ทำการศึกษาและทดลองคุณสมบัติของพฤติกรรมขนส่งพาหะประจุที่แรงดันไฟฟ้าไบอัสต่ำที่ของความต้านทานไฟฟ้าในตัวอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 300 เคลวินพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเข้ากันได้กับแบบจำลองกึ่งกำลังในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 230 เคลวินซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกันกับวัสดุพอลิเมอร์และในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 230 เคลวินนั้นจะสังเกตเห็นถึงความเปราะบางของข้อมูลจากกึ่งกำลังและมีแนวโน้มขาขึ้นที่

สอดคล้องกันกับการลดลงของค่าพลังงานการกระตุ้นที่มีความสอดคล้องกันกับงานวิจัยล่าสุดในรีดิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วอร์กราดิฟออกไซด์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 6 นาโนเมตรซึ่งการปรับปรุงการนำไฟฟ้าที่เป็นผลกระทบจากความร้อนเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสะท้อนให้เห็นจากข้อมูลที่คำนวณจากการทดลองโดยกฎกำลังซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความยาวคลื่นเลเซอร์ด้วยเหตุนี้จึงเกิดเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์ และโดยรวมแล้วรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์นั้นยังเป็นวัสดุสำคัญและมีประสิทธิภาพสำหรับตัวนำยิ่งยวดและอุปกรณ์ที่ต้องใช้สำหรับกระแสไฟฟ้าแรงสูงโดยการค้นพบในงานวิจัยนี้สามารถนำเสนอผลที่คาดว่าจะทำให้เกิดความเข้าใจใหม่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์และเกิดเป็นความรู้ที่มีประโยชน์สำหรับงานวิจัยในด้านนี้และการนำไปใช้ต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ได้จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการขนส่งพาหะประจุของฟิล์มรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์ ยังคงมีส่วนที่ต้องทำการทดลองเพิ่มเติมทั้งในส่วนของที่ยืนยันความถูกต้องของข้อมูลเพิ่มเติม สำหรับการเปรียบเทียบกับแบบจำลองต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้แค่ในเชิงคุณภาพแต่ไม่สมเหตุสมผลในเชิงปริมาณ และสำหรับปรากฏการณ์การพังทลายทางไฟฟ้าของตัวอย่างรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์ในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง ขอเสนอให้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้เพื่อยืนยันสาเหตุ แหล่งที่มา และหาขอบเขตของปรากฏการณ์ดังกล่าว อีกทั้งยังสามารถนำฟิล์มบางรีดิวซ์กราดิฟออกไซด์นี้ไปศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยืดหยุ่น โค้งงอได้ หรือกระทั่งนำไปใช้กับวัสดุนาโนคอมโพสิตหรือโพลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Geim A., N. K. (2007). The rise of graphene. *Nature Mater* 6, 183-191.
- [2] Ribeiro, N. M. (2009). Focus on graphene. *New J. Phys*, 11 095002.
- [3] Dreyer, D. R. (2010). The chemistry of graphene oxide. *The Royal Society of Chemistry*, 228-240.
- [4] Novoselov, K. G. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 197-200.
- [5] Mohammed Arif Poothanari, Y. B. (2019). Carbon nanostructures for electromagnetic shielding applications. *Industrial Applications of Nanomaterials*, 205-223.
- [6] Economou, A. D. (2015). A Pedestrian Approach to the Aromaticity of Graphene and Nanographene: Significance of Huckel's $(4n+2)\pi$ Electron Rule. *The Journal of Physical Chemistry C*, 16991-17003.
- [7] Geim, A. K. (2012). Graphene prehistory. *Physica Scripta*, 014003.
- [8] Nagashima, C. O. (1997). Ultra-thin epitaxial films of graphite and hexagonal boron nitride on solid surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1-20.
- [9] Daniel R. Cooper, B. D. (2012). Experimental review of graphene. *ISRN Condensed Matter Physics*, 1-56.
- [10] Tran, N. L. (2017). Geometric and electronic properties of graphene-related systems: Chemical bondings.
- [11] Daisuke Kasuya, M. Y. (2002). Selective Production of Single-Wall Carbon Nanohorn Aggregates and Their Formation Mechanism *The Journal of Physical Chemistry B. The Journal of Physical Chemistry B*, 4947-4951.
- [12] Lewis, T. J. (1996). Constraints on Stellar Grain Formation from Presolar Graphite in the Murchison Meteorite. *The Astrophysical Journal*, 760-782.
- [13] Wackenhut, P. F. (2002). The Core Structure of Presolar Graphite Onions. *The Astrophysical Journal Letters*, L153-L156.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] A. H. Castro Neto, F. G. (2009). The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.*, 109-162.
- [15] Y. Kopelevich, J. H. (2003). Reentrant Metallic Behavior of Graphite in the Quantum Limit. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 156402.
- [16] Semenoff, G. W. (1984). Condensed-Matter Simulation of a Three-Dimensional Anomaly. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2449–2452.
- [17] Wallace, P. R. (1947). The Band Theory of Graphite. *PHYSICAL REVIEW JOURNALS ARCHIVE*, 622-634.
- [18] Avouris P., C. Z. (2007). Carbon-based electronics. *Nature Nanotech*, 605-615.
- [19] C. A. Lamas, D. C. (2009). Generalized Pomeranchuk instabilities in graphene. *PHYSICAL REVIEW B*, 75108.
- [20] Novoselov, K. G. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 197-200.
- [21] S. V. Morozov, K. S. (2008). Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 016602.
- [22] Chen, J. J. (2008). Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂. *Nature Nanotech*, 206-209.
- [23] Goldsman, A. A. (2008). Electron transport and full-band electron-phonon interactions in graphene. *Journal of Applied Physics*, 053702.
- [24] Sagade, A. A. (2015). Highly air stable passivation of graphene based field effect devices. *Nanoscale*, 3558-3564.
- [25] Baringhaus, J. R. (2014). Exceptional ballistic transport in epitaxial graphene nanoribbons. *Nature*, 349-354.
- [26] Chen, J. J. (2008). Charged-impurity scattering in graphene. *Nature*, 377–381.
- [27] Schedin, F. G. (2007). Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Mater*, 652-655.
- [28] Sarma, S. A. (2007). A self-consistent theory for graphene transport. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 18392-18397.
- [29] Wojtaszek, M. (2009). Graphene : a two type charge carrier system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] Alexander A. Balandin, S. G. (2008). Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Letters*, 902-907.
- [31] Weiwei Cai, A. L. (2010). Thermal Transport in Suspended and Supported Monolayer Graphene Grown by Chemical Vapor Deposition. *Nano Letters*, 1645-1651.
- [32] Clement Faugeras, B. F. (2010). Thermal Conductivity of Graphene in Corbino Membrane Geometry. *ACS Nano*, 1889-1892.
- [33] Xu, X. P. (2014). Length-dependent thermal conductivity in suspended single-layer graphene. *Nature Communications*, 3689.
- [34] Jae-Ung Lee, D. Y. (2011). Thermal conductivity of suspended pristine graphene measured by Raman spectroscopy. *PHYSICAL REVIEW B*, 081419.
- [35] Shi, J. H. (2010). Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene. *Science*, 213-216.
- [36] Klemens, P. (2001). Theory of Thermal Conduction in Thin Ceramic Films. *International Journal of Thermophysics*, 265-275.
- [37] Wanyoung Jang, Z. C. (2010). Thickness-Dependent Thermal Conductivity of Encased Graphene and Ultrathin Graphite. *Nano Letters*, 3909-3913.
- [38] Chen, S. W. (2012). Thermal conductivity of isotopically modified graphene. *Nature Mater*, 203-207.
- [39] Broido, N. M. (2005). Carbon Nanotube Ballistic Thermal Conductance and Its Limits. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 096105.
- [40] Marzari, N. M. (2005). First-principles determination of the structural, vibrational and thermodynamic properties of diamond, graphite, and derivatives. *PHYSICAL REVIEW B*, 205214.
- [41] Shin, H. G. (2017). Effect of graphene-substrate conformity on the in-plane thermal conductivity of supported graphene. *Carbon*, 39-48.
- [42] Bhuyan, M. U. (2016). Synthesis of graphene. *Int Nano Lett*, 65-83.
- [43] Ruoff, X. L. (1999). Tailoring graphite with the goal of achieving single sheets. *Nanotechnology*, 269-272.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [44] Firsov, K. S. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 666-669.
- [45] Geim, K. S. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 10451-10453.
- [46] Alexander A. Balandin, S. G. (2008). Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Letters*, 902-907.
- [47] Stumpp, H. P. (1994). Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds (IUPAC Recommendations 1994). *Pure and Applied Chemistry*, 1893-1901.
- [48] Matthew J. Allen, V. C. (2010). Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chemical Reviews*, 132-145.
- [49] Kaner, L. M. (2003). A Chemical Route to Carbon Nanoscrolls. *Science*, 1361-1361.
- [50] Park S., R. R. (2009). Chemical methods for the production of graphenes. *Nature Nanotech*, 217-224.
- [51] Alfonso Reina, X. J. (2009). Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. *Nano Letters*, 30-35.
- [52] Jiao L., W. X. (2010). Facile synthesis of high-quality graphene nanoribbons. *Nature Nanotech*, 321-325.
- [53] Kosynkin D., H. A. (2009). Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. *Nature*, 872-876.
- [54] Jiao L., Z. L. (2009). Narrow graphene nanoribbons from carbon nanotubes. *Nature*, 877-880.
- [55] al, G. X. (2010). A graphene sheet exfoliated with microwave irradiation and interlinked by carbon nanotubes for high-performance transparent flexible electrodes. *Nanotechnology*, 405201.
- [56] P., S. (2009). How silicon leaves the scene. *Nature Mater*, 171-172.
- [57] Sun, A. T. (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 31-47.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [58] Mishra, P. S. (2018). Reduced graphene oxide based temperature sensor: Extraordinary performance governed by lattice dynamics assisted carrier transport. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 424-435.
- [59] Rajput, N. S. (2021). Synthesis of holey graphene for advanced nanotechnological applications. *RSC Adv*, 27381-27405.
- [60] Adere Tarekegne Habte, D. W. (2019). Synthesis and Characterization of Reduced Graphene Oxide (rGO) Started from Graphene Oxide (GO) Using the Tour Method with Different Parameters. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- [61] Jeonggeun Jo, S. L. (2019). Facile synthesis of reduced graphene oxide by modified Hummer's method as anode material for Li-, Na- and K-ion secondary batteries. *Royal Society Open Science*.
- [62] Tarcn, R. a.-B. (2020). Reduced graphene oxide today. *J. Mater. Chem. C*, 1198-1224.
- [63] Joung, D. (2014). Electronic Transport Investigation Of Chemically Derived Reduced Graphene Oxide Sheets.
- [64] Lim, E. W. (2015). Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey. *Electronics*, 586-613.
- [65] Ho-Jong Kim, D. K. (2015). Charge Transport in Thick Reduced Graphene Oxide Film. *The Journal of Physical Chemistry C*, 28685-28690.
- [66] Groot, M. K. (2008). Thermionic field emission at electrodeposited Ni-Si Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 1032-1038.
- [67] Frenkel, J. (1938). On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors. *Phys. Rev.*, 647-648.
- [68] Simmons, J. G. (1967). Poole-Frenkel Effect and Schottky Effect in Metal-Insulator-Metal Systems. *Phys. Rev.*, 657-660.
- [69] Nordheim, R. H. (1928). Electron emission in intense electric fields. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [70] Pandey, S. a.-H. (2014). Transition from direct to Fowler–Nordheim tunneling in chemically reduced graphene oxide film. *Nanoscale*, 3410-3417.
- [71] Langmuir, I. (1913). The Effect of Space Charge and Residual Gases on Thermionic Currents in High Vacuum. *Phys. Rev.*, 450-486.
- [72] Child, C. D. (1911). Discharge From Hot CaO. *Phys. Rev.*, 492-511.
- [73] Zhang, P. a. (2017). 100 years of the physics of diodes. *Applied Physics Reviews*, 011304.
- [74] Zhang, P. a. (2021). Space–charge limited current in nanodiodes: Ballistic, collisional, and dynamical effects. *Journal of Applied Physics*, 100902.
- [75] Leighton, P. A. (1941). Electronic Processes in Ionic Crystals (Mott, N. F.; Gurney, R. W.). *Journal of Chemical Education*, 249.
- [76] Murgatroyd, P. N. (1970). Theory of space-charge-limited current enhanced by Frenkel effect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 151.
- [77] Hummers, W. S. (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 1339-1339.
- [78] Spahr, H. a.-H. (2013). Conduction mechanisms in thin atomic layer deposited Al₂O₃ layers. *Journal of Applied Physics*, 183714.
- [80] Kajen, R. S. (2013). Charge transport in lightly reduced graphene oxide: A transport energy perspective. *Journal of Applied Physics*, 063710.
- [81] Joung, D. a. (2010). Space charge limited conduction with exponential trap distribution in reduced graphene oxide sheets. *Applied Physics Letters*, 093105.
- [82] Simmons, J. G. (1963). Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film. *Journal of Applied Physics*, 1793-1803.
- [83] Ramamoorthy, H. a.-P. (2016). “Freeing” Graphene from Its Substrate: Observing Intrinsic Velocity Saturation with Rapid Electrical Pulsing. *Nano Letters*, 399-403.
- [84] Bird, H. R.-P. (2017). Probing charge trapping and joule heating in graphene field-effect transistors by transient pulsing. *Semiconductor Science and Technology*,

- [85] Rahaman, A. B. (2019). Observation of Different Charge Transport Processes and Origin of Magnetism in rGO and rGO-ZnSe Composite. *The Journal of Physical Chemistry C*, 15441-15450.
- [86] Pal, A. S. (2015). Exponentially distributed trap-controlled space charge limited conduction in graphene oxide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 445501.
- [87] Sakhuja, J. a. (2020). Investigating Transient Characteristics of Volatile Hysteresis and Self-Heating of PrMnO₃-Based RRAM. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 5520-5525.
- [88] Negishi, R. A. (2016). Band-like transport in highly crystalline graphene films from defective graphene oxides. *Sci Rep*, 28936.
- [89] Yuan, G.-j. a.-F.-H.-X.-Z. (2020). Thermally Reduced Graphene Oxide/Carbon Nanotube Composite Films for Thermal Packaging Applications. *Materials*.
- [90] Talapatra, B. M. (2014). Temperature dependent electrical transport of disordered reduced graphene oxide. *2D Materials*, 011008.
- [91] Park, S. J. (2014). The effect of oxygen functional groups on the electrical transport behavior of a single piece multi-layered graphene oxide. *Synthetic Metals*, 1-5.
- [92] Kim, H.-J. a. (2015). Charge Transport in Thick Reduced Graphene Oxide Film. *The Journal of Physical Chemistry C*, 28685-28690.
- [93] Park, M. a. (2017). Electrical and thermoelectric transport by variable range hopping in reduced graphene oxide. *Applied Physics Letters*, 173103.
- [94] Wang, J. M. (2017). Functional chemically modified graphene film: microstructure and electrical transport behavior. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 435101.
- [95] A, M. N. (1979). *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*.
- [96] Ravi, S. a. (2013). Charge transport in surfactant-free single walled carbon nanotube networks. *physica status solidi (b)*, 1463-1467.
- [97] Kovtun, A. a. (2021). Multiscale Charge Transport in van der Waals Thin Films: Reduced Graphene Oxide as a Case Study. *ACS Nano*, 2654-2667.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [98] Rodin, A. S. (2010). Apparent Power-Law Behavior of Conductance in Disordered Quasi-One-Dimensional Systems. *Phys. Rev. Lett.*, 106801.
- [99] Hu, Y. W. (2018). Reduced graphene oxide film with record-high conductivity and mobility. *Materials Today*, 186-192.
- [100] Chen, Y. a. (2016). Reduced Graphene Oxide Films with Ultrahigh Conductivity as Li-Ion Battery Current Collectors. *Nano Letters*, 3616-3623.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายครองธรรม ธรรมครองอาตม์
วัน/เดือน/ปีเกิด	19/พฤษภาคม/2540
ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน	229/9 ถ.ดอนนกก ต.ตลาด อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84000
ประวัติการศึกษา	2015-2019 ระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2019-2022 ระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียน
ผลงานทางวิชาการ	K. Thamkrongart, H. Ramamoorthy, K. Buapan, T. Choawchan, and R. Somponsane, Investigation of the high-field transport, Joule-heating-driven conductivity improvement and low-field resistivity behaviour in lightly-reduced free-standing graphene oxide papers, The Joint International Conference on Applied Physics and Materials Applications & Applied Magnetism and Ferroelectrics (ICAPMA-JMAG-2021)) - Oral presentation, The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020) - Poster presentation
ผลงานการตีพิมพ์	1) K. Thamkrongart, H. Ramamoorthy, K. Buapan, T. Choawchan, and R. Somponsane, Investigation of the high-field transport, Joule-heating-driven conductivity improvement and low-field resistivity behaviour in lightly-reduced free-standing graphene oxide papers, J. Phys. D: Appl. Phys. 2022, 55, 245103 2) H. Ramamoorthy, K. Buapan, T. Chiawchan, K. Thamkrongart, and R. Somponsane, Exploration of the temperature-dependent correlation present in the structural, morphological

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and electrical properties of thermally reduced free-standing graphene oxide papers. *Journal of Materials Science* 56, 15134-15150 (2021)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้